

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDREY LESSA DERCI AUGUSTYNCZIK

**PLANEJAMENTO FLORESTAL OTIMIZADO CONSIDERANDO ÁREAS
MÍNIMAS E MÁXIMAS OPERACIONAIS DE COLHEITA**

CURITIBA
2014

ANDREY LESSA DERCI AUGUSTYNCZIK

**PLANEJAMENTO FLORESTAL OTIMIZADO CONSIDERANDO ÁREAS
MÍNIMAS E MÁXIMAS OPERACIONAIS DE COLHEITA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Co-orientador: Prof. Dr. Arinei Carlos Lindbeck da
Silva

CURITIBA
2014

Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR
Ficha catalográfica elaborada por Denis Uezu – CRB 1720/PR

Augustynczik, Andrey Lessa Derci

Planejamento florestal otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita / Andrey Lessa Derci Augustynczik. – 2014
170 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador: Prof. Dr. Arinei Carlos Lindbeck da Silva

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 27/08/2014.

Área de concentração: Manejo florestal

1. Madeira - Exploração. 2. Manejo florestal - Planejamento. 3. Colheita florestal. 4. Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Silva, Arinei Carlos Lindbeck da. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.31

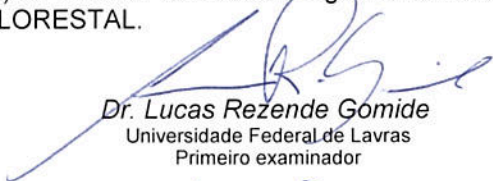



Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

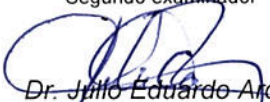
PARECER

Defesa nº. 1057

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) mestrando(a) *Andrey Lessa Derci Augustynczyk* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**PLANEJAMENTO FLORESTAL OTIMIZADO CONSIDERANDO ÁREAS MÍNIMAS E MÁXIMAS OPERACIONAIS DE COLHEITA**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Mestre* em Engenharia Florestal, área de concentração em **MANEJO FLORESTAL**.



Dr. Lucas Rezende Gomide
Universidade Federal de Lavras
Primeiro examinador


Dr. Neida Maria Patias Volpi
Universidade Federal do Paraná
Segundo examinador


Dr. Júlio Eduardo Alce
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 27 de agosto de 2014.


Antonio Carlos Batista
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

A minha mãe, Ivana Lessa Silveira
Derci e, aos meus irmãos, Alan
Lessa Derci Augustynczik e
Alexandre Lessa Derci
Augustynczik.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à minha família, minha mãe Ivana Lessa Silveira Derci, aos meus irmãos Alan Lessa Derci Augustynczik e Alexandre Lessa Derci Augustynczik e a minha esposa Paula Sartorato Pedrotti, pela compreensão, apoio e carinho.

Ao Prof. Julio Eduardo Arce, pela apresentação ao mundo da pesquisa operacional, pelo grande apoio durante todas as fases de elaboração deste trabalho, pela paciência e valioso conhecimento transmitido, sem os quais não seria possível a realização desta pesquisa.

Ao Prof. Carlos Arinei Lindbeck da Silva pelo apoio e valiosas lições em pesquisa operacional e programação, que tiveram papel fundamental durante a realização deste trabalho.

Aos amigos Murilo Talamini (*in memorian*), Eduardo Chaves, Everson Rodrigues, Sérgio Agostini Jr., Rodrigo Venceloski, pelo companheirismo e histórias compartilhadas.

RESUMO

Questões espaciais relacionadas ao padrão resultante das atividades de colheita florestal vem se tornando um importante componente do planejamento florestal. Geralmente estas questões são incluídas em cenários de planejamento através de consideração de relações de vizinhança entre talhões. A maior parte da literatura a respeito da inclusão de questões espaciais no planejamento se refere às restrições para limitar a área máxima de colheita. Restrições de área máxima de colheita são vistas como uma maneira de beneficiar a fauna e reduzir impactos ao solo florestal causado pelo maquinário. Este problema de planejamento é tratado no quarto capítulo deste trabalho, que tem por objetivo a incorporação de restrições de área máxima utilizando as abordagens URM e ARM a um cenário de planejamento florestal otimizado de uma floresta composta por 236 talhões do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*. Inicialmente propostas para beneficiar a fauna, a fragmentação causada por restrições que limitam a área máxima de colheita podem ter um efeito negativo sobre a mesma, reduzindo a área de habitat interior. Adicionalmente, a fragmentação das áreas de colheita causa o aumento no custo das operações envolvidas nesta atividade. Neste contexto, o objetivo do capítulo 5 foi o de introduzir restrições para a formação de blocos de colheita respeitando uma área mínima determinada, avaliando os efeitos desta restrição sobre a configuração espacial dos talhões e receita advinda da floresta. No sexto capítulo, ainda sobre a ótica da formação de blocos de colheita, são estudadas alternativas para promover a agregação das áreas de colheita, através da maximização das adjacências entre talhões em um mesmo ano do horizonte de planejamento. Foram avaliados para tal fim modelos de Programação Linear Inteira Mista e modelos de *Goal Programming*. No último capítulo, ainda sobre a ótica da agregação das áreas de colheita, se buscou a conectividade dos talhões a serem colhidos em um mesmo ano do horizonte de planejamento. Para tal, foi aplicado um modelo baseado no problema da arborescência mínima. Os efeitos da inclusão de critérios para a formação de blocos de colheita foram avaliados com base no agendamento espacial da colheita e na alteração do VPL gerado pela floresta.

Palavras chave: planejamento espacial, otimização, agregação da colheita florestal

ABSTRACT

Spatial relationships related to the pattern resulting from forest harvest activities have become an important component of forest planning. Usually, these spatial relationships are included in forest planning scenarios through the consideration of neighborhood relationships between the stands. The major part of literature regarding the consideration of spatial questions is related to limiting the maximum harvest area. Limiting the maximum harvest area is viewed as a way to benefit wildlife and reduce the impacts on the soil caused by the machinery. This planning problem is addressed in the fourth chapter of this study, which has the objective of including maximum area constraints applying URM and ARM approaches in an optimized forest planning model of a forest composed by 236 *Pinus* and *Eucalyptus* stands. Initially proposed to benefit wildlife, the fragmentation caused by the constraints that limit the maximum harvest area can have a negative impact on the wildlife, reducing the interior habitats. Additionally, the fragmentation of harvest area causes an increase in the cost of the harvesting operations. In this context, the objective of chapter 5 was to introduce constraints for blocking harvesting activities, respecting a minimum area and evaluate its effect on the spatial configuration of stands scheduled for harvesting and on the receipt coming from the forest. In the sixth chapter, still addressing the clustering of harvest activities, approaches to promote the aggregation of stands are studied. This is addressed through the maximization of adjacencies between stands in a same year of the planning horizon. For performing this analyses models of Mixed Integer Linear Programming and Goal Programming were tested. In the last chapter, still aiming for aggregating the harvesting areas, it was sought to obtain the connectivity of stands to be harvest in the same year of the planning horizon. To achieve the connectivity, a model based in the minimum spanning tree problem was applied. The effects of inclusion of the clustering criteria was evaluated based on the spatial distribution of stands scheduled for harvesting and in the variation of the NVP generated by the forest.

Key words: spatial planning; optimization; clustering forest harvesting

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – HIERARQUIA DO PLANEJAMENTO DE RECURSOS	
NATURAIS.....	6
FIGURA 4.1 – ÁREA DE ESTUDO COM TALHÕES EM DESTAQUE.....	37
FIGURA 4.2 – EXEMPLO DE LISTA DE ADJACÊNCIA.....	38
FIGURA 4.3 – AGENDAMENTO DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS SEM	
RESTRIÇÕES DE EQUILÍBRIO.....	46
FIGURA 4.4 – VOLUME DE COLHEITA ANUAL NOS CENÁRIOS SEM	
RESTRIÇÕES DE EQUILÍBRIO.....	48
FIGURA 4.5 – AGENDAMENTO DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS COM	
RESTRIÇÕES DE EQUILÍBRIO.....	51
FIGURA 4.6 – VOLUME DE COLHEITA ANUAL NOS CENÁRIOS COM	
RESTRIÇÕES DE EQUILÍBRIO.....	53
FIGURA 5.1 - ÁREA DE ESTUDO HIPOTÉTICA.....	69
FIGURA 5.2 – AGENDAMENTO DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS LIVRE E RING	
INEQUALITIES.....	79
FIGURA 5.3 - DISTRIBUIÇÃO DE IDADES POR ESPÉCIE.....	81
FIGURA 5.4 – VOLUME ANUAL DE COLHEITA PARA OS CENÁRIOS SEM	
RESTRIÇÕES DE ÁREA MÍNIMA.....	83
FIGURA 5.5 – AGENDAMENTO DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS COM	
RESTRIÇÕES DE BLOCOS COM 10 HA DE	
AMPLITUDE.....	84

FIGURA 5.6 – AGENDAMENTO DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS COM RESTRIÇÕES DE BLOCOS COM 20 HA DE AMPLITUDE.....	87
FIGURA 5.7 – PERFORMANCE DAS FORMULAÇÕES EM NÚMERO DE RESTRIÇÕES E MELHOR BOUND.....	89
FIGURA 6.1 – AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA.....	120
FIGURA 6.2 – VOLUMES ANUAIS DE PRODUÇÃO.....	123
FIGURA 6.3 – AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS DE GOAL PROGRAMMING.....	125
FIGURA 7.1 – EXEMPLO DE ARBORESCÊNCIA MÍNIMA.....	139
FIGURA 7.2 – AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA.....	150

LISTA DE QUADROS

QUADRO 5.1 - PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO PARA FORMAÇÃO DE RESTRIÇÕES DE ÁREA MÍNIMA.....	69
QUADRO 5.2 - PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO PARA FORMAÇÃO DE BLOCOS DE COLHEITA.....	73
QUADRO 7.1 - RELAXAÇÃO <i>RPcycle</i>	148

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – CENÁRIOS TESTADOS.....	44
TABELA 4.2 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA CADA CENÁRIO.....	55
TABELA 5.1 – CENÁRIOS TESTADOS.....	77
TABELA 5.2 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO.....	91
TABELA 6.1 – CENÁRIOS TESTADOS.....	118
TABELA 6.2 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO.....	128
TABELA 7.1 – CENÁRIOS TESTADOS.....	149
TABELA 7.2 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO.....	154

LISTA DE SIGLAS

HP	Horizonte de Planejamento
VPL	Valor Presente Líquido
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
GP	Goal Programming
PL	Programação Linear
FO	Função Objetivo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 PLANEJAMENTO FLORESTAL	4
3.2 PESQUISA OPERACIONAL.....	7
3.2.1 Programação Linear	7
3.2.2 Programação Linear Inteira/ Programação Linear Inteira Mista.....	10
3.2.3 Otimização combinatória	11
3.3 COLHEITA FLORESTAL	13
3.3.1 Planejamento da colheita.....	14
3.3.2 Custos da colheita	15
3.4 PLANEJAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA.....	16
3.4.1 Restrições de adjacência.....	19
3.4.1.1 Modelos de adjacência.....	20
3.4.1.2 Unit Restriction Model (URM)	21
3.4.1.3 Area Restriction Model (ARM)	22
3.4.2 Corredores ecológicos	24
3.5 BIBLIOGRAFIA	27
4 PLANEJAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA CONSIDERANDO ÁREAS MÁXIMAS OPERACIONAIS.....	32
4.1 INTRODUÇÃO	34
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4.2.1 Área de estudo	36
4.2.2 Restrições de adjacência.....	38
4.2.2.1 Restrições URM	40
4.2.2.2 Restrições ARM.....	40
4.2.3 Modelo de Otimização	41
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.4 CONCLUSÕES	59
4.5 BIBLIOGRAFIA	60

5 PLANEJAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA CONSIDERANDO ÁREAS MÍNIMAS OPERACIONAIS	62
5.1 INTRODUÇÃO	64
5.2 MATERIAIS E MÉTODOS	66
5.2.1 Área de estudo	66
5.2.2 Modelos de Otimização	66
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
5.4 CONCLUSÕES	95
5.5 BIBLIOGRAFIA	96
6 AGREGAÇÃO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA FLORESTAL ATRAVÉS DE FORMULAÇÕES DE PLIM.....	98
6.1 INTRODUÇÃO	100
6.2 MATERIAIS E MÉTODOS	102
6.2.1 Área de estudo	102
6.2.2 Modelos testados.....	102
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	119
6.4 CONCLUSÕES	132
6.5 BIBLIOGRAFIA	134
7 PROMOVENDO A CONECTIVIDADE DAS ÁREAS DE COLHEITA EM PROBLEMAS DE AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL	135
7.1 INTRODUÇÃO	137
7.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	138
7.2.1 Área de estudo	138
7.2.2 Modelo de otimização	139
7.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	149
7.4 CONCLUSÕES	156
7.5 BIBLIOGRAFIA	157
ANEXO I – LISTA DE TALHÕES	159
ANEXO II – LISTA DE ADJACÊNCIAS	165

1 INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, cada vez mais, organizações públicas e privadas buscam obter o máximo retorno sobre seus empreendimentos, seja sob o aspecto econômico ou da produção física de um determinado produto. No contexto florestal, é de grande importância o planejamento estratégico da produção, procurando diminuir os custos e aumentar a receita provinda da floresta, de maneira a garantir a competitividade dessas organizações no mercado (ANDERSSON, 2005). Esse planejamento envolve o gerenciamento de uma grande quantidade de áreas plantadas, operações e pessoas, de maneira que comumente diferentes áreas do processo produtivo competem pelos mesmos recursos, o que torna a alocação dos mesmos uma tarefa complexa (BUONGIORNO e GILLES, 2003). Desta maneira, para se obter um retorno satisfatório sobre o investimento é necessário realizar um manejo florestal adequado, alocando os fatores de produção de forma a alcançar os objetivos estabelecidos. Neste contexto, a Programação Linear surge como uma importante ferramenta no auxílio à tomada de decisão. A Programação Linear (PL) é uma ferramenta matemática de otimização, que pode ser aplicada em vários tipos de problemas que envolvem planejamento, com uma ampla gama de aplicações na área florestal, notadamente no planejamento da colheita florestal.

A colheita florestal trata de uma série de intervenções às unidades de manejo, de maneira a garantir a sustentabilidade da produção em longo prazo (MILLS e MCDILL, 2008). Um dos maiores desafios com que as empresas florestais se deparam na realização do planejamento da colheita está relacionado à questão logística, ou seja, analisar a disposição espacial das unidades de manejo a serem colhidas, conciliando interesses econômicos e ambientais. Neste sentido, uma das políticas mais comuns para minimizar o dano ambiental das atividades de colheita é a implantação de limites máximos de área.

Esse limite de área varia de acordo com as características de cada região e estão relacionadas a questões políticas, processos de certificação ou questões operacionais (GOMIDE, 2009). As abordagens mais utilizadas para resolver esse

tipo de questão são as abordagens URM e ARM. A abordagem URM (*Unit Restriction Model*) impede que talhões adjacentes sejam colhidos no mesmo ano do horizonte de planejamento. A abordagem ARM (*Area restriction Model*), leva em consideração a área dos talhões, permitindo que talhões contíguos sejam colhidos no mesmo ano do horizonte de planejamento desde que a área do bloco formado não exceda a área máxima de corte raso determinada (ZHU et al., 2007). A abordagem ARM tem uma formulação mais complexa se comparada à abordagem URM.

Por outro lado, as organizações privadas buscam sempre o maior retorno de seus empreendimentos. Com a incorporação de questões logísticas ao planejamento da colheita é possível alocar as máquinas florestais de maneira ótima, reduzindo a distância percorrida pelas mesmas entre as unidades de manejo selecionadas para receber o corte raso. Desta forma, a eficiência da operação aumenta, em virtude da redução do tempo improdutivo necessário para a movimentação das máquinas entre as frentes de colheita. Adicionalmente, os custos relacionados à construção e manutenção de estradas são reduzidos nestes cenários.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar o planejamento florestal otimizado de uma floresta de produção, incorporando restrições de áreas máximas e mínimas operacionais, agregação e conectividade da colheita.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Implementar o algoritmo *Path* proposto por McDill (2002), para a geração de restrições de adjacência de área máxima do tipo ARM (*Area Restriction Model*).

Implementar algoritmos para a geração de restrições para a formação de blocos de colheita de área mínima.

Propor metodologias para a agregação das atividades de colheita em um mesmo ano do horizonte de planejamento, com o objetivo de redução de custos das operações.

Avaliar o impacto das restrições de adjacência sobre o valor da função objetivo do modelo de planejamento e sobre a configuração espacial dos talhões agendados para a colheita.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PLANEJAMENTO FLORESTAL

O planejamento florestal envolve as descrições específicas de atividades que devem ser realizadas visando atingir os objetivos que o proprietário deseja para sua área. Manejar a floresta sem o planejamento adequado, tomando decisões baseadas apenas em considerações de curto prazo, pode acarretar em consequências indesejáveis ou inesperadas. Como resultado, o processo de planejamento é um importante aspecto do manejo florestal. Se o plano de manejo não é cuidadosamente preparado, as atividades implementadas podem não atingir os resultados esperados pelo gestor (BETTINGER, 2009).

Segundo SCHNEIDER (2009), o planejamento em geral envolve o levantamento e avaliação da situação atual e sua comparação com a situação desejada. A partir desta comparação são traçadas as estratégias para a execução das atividades, visando alcançar esta situação desejada em um determinado período do tempo. A partir do planejamento, as diferentes atividades dentro de uma empresa são ordenadas e organizadas, dentro de certo espaço de tempo, visando atingir a meta econômica. Segundo o autor, o planejamento florestal pode ser dividido, conforme o período em que se aplica em:

- a) Planejamento de longo prazo: São de 20 anos ou mais, que incluem a escolha de espécies, modificação do sistema silvicultural, equilíbrio do estoque, construção de prédios de longa durabilidade, aumento ou diminuição do quadro pessoal da empresa, etc.
- b) Planejamento de médio prazo: São de 5 a 20 anos, incluem a revisão de planos, construção de estradas, equipamento e financiamento de máquinas, veículos, viveiro, etc.

- c) Planejamento de curto prazo: São de 1 ou mais anos. Geralmente é o planejamento anual e relaciona-se diretamente com as atividades de corte, exploração, reflorestamento, utilização e manutenção de máquinas, etc.

Tradicionalmente o planejamento florestal é dividido de forma hierárquica em fases de planejamento. Planejamento estratégico é realizado visando a obtenção de níveis de colheita sustentáveis, respeitando a legislação. Dentro do planejamento estratégico, o planejamento tático tem como objetivo programar colheitas em áreas específicas, em uma escala de tempo menor que o planejamento estratégico. A fase de operação centra-se no gerenciamento dos trabalhadores e máquinas semanalmente ou mensalmente. As decisões em todos os níveis, em graus diferentes, podem ser auxiliadas por ferramentas computadorizadas (ANDERSSON, 2005).

Para MARTELL et al. (1998) o planejamento estratégico comumente é realizado para extensas áreas e horizontes de planejamento. Este planejamento geralmente é realizado com objetivo de maximização do valor presente da floresta, regulação do fluxo de madeira para abastecer a indústria florestal e mais recentemente vem incluindo as questões ambientais visando à sustentabilidade dos recursos florestais. O planejamento estratégico é a fase em que as técnicas de pesquisa operacional são mais utilizadas e possuem maior impacto. Segundo o mesmo autor o planejamento tático é realizado pelos gestores para áreas de escala intermediária que se referem, por exemplo, à rota das estradas de acesso e a decisão dos talhões que serão colhidos dentro de um horizonte de planejamento de 1 a 5 anos. O planejamento tático se torna mais complexo à medida que são incluídas as questões espaciais como a conectividade de corredores ecológicos e a construção de estradas. O planejamento operacional é realizado em curto prazo e envolve a tomada de decisões sobre: (a) seleção e localização do maquinário florestal, (b) seleção dos talhões a serem colhidos, (c) o modelo de traçamento do tronco, (d) suprimento da demanda de madeira e (e) a logística do transporte.

Para BETTINGER (2009), os aspectos espaciais dos planos de manejo são geralmente ignorados no planejamento estratégico. Em níveis mais baixos da hierarquia do planejamento as relações espaciais são reconhecidas. No planejamento tático são considerados assuntos relacionados à localização espacial e temporal das atividades de manejo. Planos que envolvem modelos de habitat espaciais são planos táticos, pois as relações entre as unidades de habitat são reconhecidas. No nível mais baixo da hierarquia está o planejamento operacional, este é o planejamento diário, semanal, mensal ou anual necessário à implementação das atividades de manejo. O autor resume a hierarquia do processo de planejamento da seguinte maneira (FIGURA 3.1):

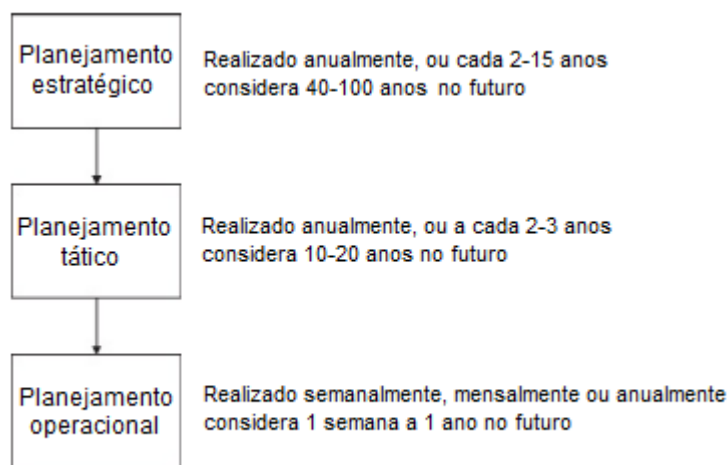


FIGURA 3.1 – HIERARQUIA DO PLANEJAMENTO DE RECURSOS NATURAIS

(BETTINGER, 2009)

ANDERSSON (2005) ressalta que o planejamento florestal é um processo que envolve grandes empresas, extensas áreas florestais, grande número de pessoas e atividades em diferentes níveis. Questões importantes no planejamento florestal incluem a sustentabilidade em longo prazo dos recursos florestais bem como o fluxo constante de madeira. Também são importantes as questões de curto prazo relacionadas ao acesso aos talhões e a rede viária. A utilização de maquinário e sua alocação nas áreas de colheita também devem ser consideradas no processo de planejamento.

Conforme BUONGIORNO e GILLES (2003), os problemas relacionados ao manejo florestal envolvem um grande número de diferentes variáveis. Algumas variáveis são biológicas, como o potencial de crescimento; outras econômicas como o preço da madeira e outras são sociais, como as leis ambientais. Frequentemente estas variáveis interagem entre si, tornando o planejamento florestal uma tarefa complexa. Nestas situações complexas, a utilização de técnicas de pesquisa operacional surge como uma importante ferramenta de auxílio à tomada de decisão, permitindo a obtenção de um manejo florestal adequado.

3.2 PESQUISA OPERACIONAL

3.2.1 Programação Linear

De acordo com SILVA (2006), Programação linear é um método da Pesquisa Operacional aplicada à solução de problemas que objetivam a otimização de um sistema de estudo. A otimização refere: 1- a maximização de parâmetros tais como: lucro, vendas, uso efetivo de uma área, nível de produção e uso de um determinado recurso; ou 2- a minimização de parâmetros tais como: custo de produção, uso de determinado recurso de alto valor monetário e emprego de mão-de-obra.

Segundo DANTZIG (1998), a abordagem da programação linear consiste em decompor o sistema que se está estudando em certo número de funções elementares, as atividades. Ainda o autor identifica algumas premissas de um problema de programação linear:

- 1) Proporcionalidade: as quantidades de recurso utilizadas são sempre proporcionais ao nível da atividade. Se o gestor deseja dobrar o nível de atividade, é necessário dobrar a utilização do recurso.
- 2) Não negatividade: enquanto qualquer múltiplo positivo de uma atividade for possível, quantidades negativas da atividade não são possíveis. As atividades desenvolvidas não podem ser feitas em quantidades

negativas, por exemplo, não se pode produzir um produto em quantidades negativas.

- 3) Aditividade: a quantidade total de cada atividade especificada pelo sistema deve ser igual à soma total do fluxo de recursos que entram na atividade menos a soma total dos recursos que saem da atividade.
- 4) Função objetivo linear: a função objetivo é um dos itens do sistema, e em geral mede o retorno obtido. A contribuição de cada atividade para o retorno total é a quantidade do recurso considerado na função objetivo que é adicionado ou retirado pela atividade. Assim, se o objetivo é maximizar os lucros, as atividades que utilizam dinheiro contribuem negativamente e as atividades que produzem dinheiro contribuem positivamente para o lucro total.

Segundo LUENBERGER e YE (2008), programação linear é um problema de otimização no qual as variáveis da função objetivo são lineares e as restrições consistem em equações e inequações lineares. A forma exata destas restrições pode variar de um problema para outro, porém os problemas de programação linear podem ser representados da seguinte forma padrão:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimizar ou Maximizar} & c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \cdots + c_n \cdot x_n \\
 \\
 \text{Sujeito a} & a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \cdots + a_{1n} \cdot x_n = b_1 \\
 & a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \cdots + a_{2n} \cdot x_n = b_2 \\
 & \cdot \qquad \qquad \qquad \cdot \\
 & \cdot \qquad \qquad \qquad \cdot \\
 & \cdot \qquad \qquad \qquad \cdot \\
 & a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \cdots + a_{mn} \cdot x_n = b_m \\
 & x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \quad ,
 \end{array}$$

Onde b'_i 's, c'_i 's e a'_{ij} 's são dados do problema e x'_i 's são variáveis reais positivas ou nulas a serem determinadas.

O algoritmo mais utilizado e de maior sucesso para a solução de problemas de programação linear é o algoritmo simplex. O algoritmo funciona adicionando variáveis de folga a todas as restrições. Estas variáveis representam a diferença entre o lado direito e o lado esquerdo das restrições do modelo. O método simplex é um processo iterativo que começa com uma solução básica factível que satisfaça as restrições e a condição de não negatividade. Em seguida busca uma solução em que se obtém um melhor valor para a função objetivo. Este processo continua até que a função objetivo não possa ser melhorada, atingindo então a solução ótima (VANDERBEI, 2008).

Segundo GARCIA (1990) as técnicas mais comuns utilizadas no planejamento florestal são a modelagem e a programação linear. A programação linear vem sendo utilizada na área florestal para o agendamento da colheita desde a década de 60, atingindo bons resultados. Os autores Johnson e Scheurman (1977) revisaram e analisaram muitas das abordagens disponíveis e agruparam estas abordagens em dois modelos, o Modelo I e o Modelo II.

Conforme RODRIGUES (2006), na solução de problemas utilizando os modelos de programação linear (PL) e programação inteira (PI) são usadas, basicamente, duas abordagens para a geração das alternativas de manejo, batizadas por Johnson e Scheurman (1977) como modelo I e modelo II. No modelo I, para cada unidade de manejo é gerado um conjunto de alternativas de manejo, e, uma vez dada alternativa de manejo tenha sido escolhida para dada unidade, esta permanecerá sobre tal intervenção durante o horizonte de planejamento considerado, o que permite maior identidade da unidade de manejo. Ao contrário, no modelo II regras de alocação (agrupamento e partição) de unidades de manejo quase sempre resultam na geração de menor número de alternativas de manejo ou variáveis para o mesmo problema, resultando, todavia, em perdas de identidades das unidades de manejo, em função das regras de alocação.

Ambos os modelos são utilizados e tem suas vantagens. Entretanto quando são consideradas questões espaciais no modelo de planejamento o Modelo I é mais

adequado, pois mantém a integridade espacial do talhão ao longo do horizonte de planejamento.

A Programação Linear possui uma série de aplicações na área florestal além dos problemas de agendamento da colheita. MARTELL et al. (1998) identifica aplicações e desafios da programação linear na área florestal. Entre as aplicações citadas pelo autor estão: no planejamento estratégico em que são aplicadas técnicas de PL para maximizar os lucros e fluxo sustentável de madeira; no planejamento tático envolvendo as questões espaciais de agendamento da colheita florestal e introduzindo restrições para beneficiar a vida selvagem e o habitat; no planejamento operacional na logística de transporte e alocação de máquinas florestais e nos sistemas de manejo do fogo, em que são utilizadas técnicas de PL no auxílio à tomada de decisões a respeito da prevenção do fogo, manejo de resíduos e combate a incêndios florestais.

3.2.2 Programação Linear Inteira/ Programação Linear Inteira Mista

Conforme CHINNECK(2004), a programação inteira mista (MIP) considera problemas em que algumas das variáveis no modelo possuem valor real (que podem assumir valores fracionários), positivos ou nulos e algumas das variáveis possuem valores inteiros. O modelo é, portanto, "misto". Quando a função objetivo e restrições possuem operações lineares, então é um problema de programação linear inteira mista (PLIM). As técnicas de PLIM são eficazes não só para problemas mistos, mas também para os problemas inteiros puros, problemas binários, ou de fato qualquer combinação de variáveis reais, inteiras, e valores binários.

CORNUEJOLS e TÜTÜNCÜ (2005) afirmam que a programação linear inteira é uma programação linear com restrições adicionais, nas quais algumas ou todas as variáveis necessitam ser inteiras. Quando todas as variáveis são inteiras, o problema é denominado programa linear inteiro puro. Se algumas variáveis são inteiras e outras contínuas, o problema é classificado como programação linear

inteira mista (PLIM). Ainda há problemas em que as variáveis inteiras podem assumir apenas os valores 0 e 1. Estas situações são classificadas como programação linear binária inteira pura ou mista.

Segundo os mesmos autores, historicamente o primeiro método para resolver problemas de PLIM eram baseados em planos de corte (adicionando restrições subjacentes ao programa linear, cortando as soluções não inteiras). Esta ideia foi proposta por Gomory em 1958. O algoritmo *Branch and Bound* foi proposto em 1960 por Land e Dong. Este algoritmo se baseia em dividir o problema em uma série de problemas e avaliar sua qualidade com base na resolução dos programas lineares subjacentes. O algoritmo *Branch and Bound* tem sido a técnica mais eficiente para resolver problemas de PLIM nos últimos 40 anos. Entretanto nas últimas décadas, planos de corte ressurgiram e agora são combinados com o *Branch and Bound* em um procedimento geral denominado *Branch and Cut*.

Alguns exemplos de aplicação de programação linear inteira na área florestal se referem à construção de estradas florestais, aos problemas relacionados à logística de transporte e ao agendamento espacial da colheita com restrições de adjacência. Em todas estas atividades as variáveis não podem assumir valores fracionários, necessitando técnicas de PLI e PLIM para sua resolução.

3.2.3 Otimização combinatória

Segundo ROTHLAUF (2011), os problemas de otimização combinatória buscam a alocação eficiente de recursos limitados, visando atender os objetivos desejados. As variáveis de decisão podem tomar valores de conjuntos discretos, limitados e restrições adicionais como trabalho, suprimentos, ou capital, restringem as alternativas possíveis consideradas factíveis. Usualmente, existem muitas alternativas possíveis a considerar e o objetivo da otimização define qual é a melhor. A situação é diferente de problemas de otimização contínuos onde se busca um conjunto ótimo de parâmetros ou de variáveis contínuas. Neste caso, não existem

um número limitado de alternativas, mas sim a determinação de valores ótimos para as variáveis contínuas.

A versatilidade da otimização combinatória surge do fato que em muitos problemas práticos, atividades e recursos, como maquinário, aviões e pessoas são indivisíveis. Também, diversos problemas (por exemplo, problemas de agendamento) possuem regras que definem um número finito de escolhas elegíveis. Tais problemas podem ser formulados de maneira apropriada a partir de procedimentos que transformam as alternativas lógicas de decisão em restrições de programação linear, onde certo subconjunto de variáveis deve assumir determinados valores discretos. Esse tipo de problema é definido como problema de Programação Linear Inteira Mista (HOFFMAN, 2000).

Para BLUM e ROLI (2003), em problemas de otimização combinatória se busca um objeto dentro conjunto finito. Este conjunto é tipicamente um número inteiro, um subconjunto, uma permutação ou uma estrutura de grafo. Um problema de otimização combinatória $P = (S, f)$ pode ser definido por:

- um conjunto de variáveis $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;
- domínios das variáveis D_1, D_2, \dots, D_n ;
- restrições entre as variáveis;
- uma função objetivo f a ser minimizada ou maximizada, onde $f: D_1 \times \dots \times D_n \rightarrow \mathbb{R}$;

O conjunto de todas as soluções factíveis é

$$S = \{x \in D_1 \times \dots \times D_n \mid x \text{ atende todas as restrições}\}$$

S é geralmente denominado espaço de busca (ou solução), considerando que cada elemento do conjunto pode ser visto como candidato à solução. Para resolver um problema de otimização combinatória é necessário encontrar uma solução $s^* \in S$ com valor da função objetivo mínimo (ou máximo). s^* é denominada solução ótima global de (S, f) e o conjunto $S^* \subseteq S$ é denominado conjunto de soluções globais ótimas.

Os problemas de otimização combinatória possuem uma ampla gama de aplicações práticas, notadamente em problemas envolvendo grafos. Entre estes problemas podem ser citados:

- Problema de caminho mínimo: se deseja encontrar o caminho mínimo entre 2 nós específicos de um grafo.
- Problema de arborescência mínima: tem por objetivo encontrar um conjunto de nós que liga todos os vértices do grafo com um custo mínimo.
- Problema do carteiro chinês: é desejado encontrar uma rota (um caminho fechado) que passa por cada arco de um grafo pelo menos uma vez
- Problema de corte mínimo: se procura encontrar um subconjunto de arcos com comprimento mínimo, tal que quando estes arcos são retirados do grafo, este se torna desconectado.
- Problema do caixeiro viajante: se busca uma rota que passa por cada nó de um grafo apenas uma vez.

(LAWLER, 1976).

Estes problemas são amplamente utilizados como modelo em questões práticas, como o roteamento de veículos, a construção de circuitos elétricos e redes de telecomunicações, problemas logísticos, determinação de rotas de vôo, entre outros.

3.3 COLHEITA FLORESTAL

A colheita representa a operação final de um ciclo de produção florestal, na qual são obtidos os produtos mais valiosos, constituindo um dos fatores que determinam a rentabilidade florestal (ARCE et al., 2004).

Segundo CONEGLIAN et al. (2010), a colheita florestal é considerada a parte mais importante do ponto de vista técnico-econômico, trata-se de um conjunto de operações efetuadas no maciço florestal para explorar e extrair a madeira até o local de transporte ou utilização. Regida por técnicas e padrões estabelecidos com a

finalidade de transformá-las em produto final, a colheita é composta pelas etapas de corte (derrubada, desgalhamento e processamento ou traçamento), descascamento quando executado em campo, extração e carregamento.

Segundo Silva et al. (2003), citado por FREITAS (2005), existem vários métodos e sistemas de colheita e processamento de madeira no campo, segundo a espécie florestal, idade do povoamento, finalidade a que se destina o produto, condições gerais da área de colheita e, portanto, o sistema de colheita e processamento a ser utilizado será uma função de um conjunto de fatores condicionantes. Para cada grupo de condições específicas certamente existe um método e um sistema de colheita mais indicado, a serem selecionados para que se proceda a colheita e o beneficiamento da madeira.

3.3.1 Planejamento da colheita

Segundo MACHADO (2006), as operações de corte florestal devem ser planejadas com bastante antecedência em relação à sua execução. As principais características da tecnologia de colheita dependem dos custos de equipamentos e mão-de-obra, localização e topografia das áreas florestais e da infraestrutura de apoio. De posse dessas informações, os locais específicos para colheita são selecionados e demarcados conforme o plano de manejo florestal, sistema de transporte, terreno e a escala operacional desejada. No planejamento do corte, deve-se levar em consideração a minimização dos custos, a otimização dos rendimentos e a redução dos impactos ambientais. O mesmo autor afirma que o custo de extração da madeira cresce com o aumento da distância a ser percorrida.

Para GOMIDE(2009) o agendamento da colheita florestal é um típico problema de planejamento, onde usualmente são envolvidas diversas opções de manejo, representada pelas variáveis de decisão do modelo matemático. Neste caso, o problema é estabelecer uma agenda de colheita para um período de tempo predefinido, através da seleção de talhões presentes nas áreas florestais. Geralmente estes problemas têm como objetivo a maximização de uma função de

lucro ou receita, vinculada a restrições de produção volumétrica. Esta visão bidimensional do problema considerando apenas a produção volumétrica de madeira pode repercutir em impacto ao ambiente, pois são desprezadas as relações espaciais entre os talhões na floresta, bem como a ideia de conjunto que estes formam após a colheita.

De acordo com MURRAY e WEINTRAUB (2002), as questões relacionadas à logística na colheita vêm sendo reconhecidas como um componente importante no processo de planejamento florestal. Os interesses definidos na programação da colheita incluem trabalhos de modelagem hierárquica ou multiescala, procurando integrar os níveis de planejamento estratégico e tático.

Conforme GOYCOOLEA et. al. (2005), a colheita de madeira é uma atividade necessária, porém deve ser feita de forma manter a integridade da floresta. Um desafio fundamental continua o de representar e implementar restrições para limitar os impactos espaciais nos modelos de otimização.

Segundo FALCÃO e BORGES (2003), modelos de gestão que integram preocupações com a localização geográfica das atividades florestais contribuem para evitar a segregação dos níveis de planejamento estratégico e operacional. Além disso, oferecem informação necessária para resolver problemas relativos ao transporte de produtos florestais e/ou ao arranjo espacial das operações culturais.

3.3.2 Custos da colheita

As atividades da colheita podem ser divididas em três fases básicas: corte processamento, extração e transporte, sendo que, a operação de extração (baldeio/arraste) da madeira desde o local de corte até a beira da estrada (estaleiro) é uma das atividades mais onerosas. Para redução dos custos das atividades de colheita, várias técnicas e procedimentos podem ser utilizados, em especial técnicas de pesquisa operacional, tais como: programação linear, programações inteira e mista, programação dinâmica, utilização de algoritmos e simulações. A maioria destas técnicas objetiva uma solução ótima do problema, focando

principalmente na maximização dos lucros ou na minimização dos custos (MALINOVSKI et al., 2008).

De acordo com SEIXAS et al. (2004), citado por NASCIMENTO et al. (2011), no desenvolvimento de sistemas de colheita de madeira, o estudo de tempos e movimentos é uma técnica de suma importância, uma vez que o tempo consumido para cada um dos elementos do ciclo de trabalho permite a organização do trabalho, com os objetivos de otimizar o sistema operacional, com o mínimo de tempos improdutivos. Através da minimização de tempos improdutivos é possível aumentar o rendimento das máquinas florestais e, conseqüentemente, reduzir os custos da operação.

A aquisição de máquinas florestais despende alto investimento financeiro, o que implica que a operação deve ser racionalizada, maximizando o rendimento operacional, com o objetivo de atingir o menor custo possível e a sustentação em longo prazo, adotando-se práticas economicamente viáveis (SIMÕES, 2008).

ZAGONEL (2005) ressalta que a colheita e o transporte de madeira são atividades que podem representar aproximadamente 70 % dos custos da matéria-prima (madeira) influenciando diretamente no valor final.

3.4 PLANEJAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA

Questões espaciais sempre foram importantes no planejamento florestal. O manejo tradicional, por exemplo, tem se preocupado em encontrar a maneira mais eficiente do ponto de vista econômico para colher um mosaico de talhões distribuídos pela floresta. Entretanto, a introdução de conceitos de preservação dos ecossistemas introduziu novos objetivos com relação às questões espaciais, e tornaram-se muito importantes – até mesmo quando seus objetivos diferem dos objetivos econômicos. Desta forma, é de grande importância o desenvolvimento de ferramentas para atender os objetivos econômicos e ambientais (CROWE, 2004).

De acordo com WEINTRAUB e MURRAY (2006), as recentes preocupações com respeito às condições do meio ambiente, como a proteção da vida selvagem, controle da erosão, melhora na qualidade da água e manutenção da beleza cênica, têm levado à consideração de questões espaciais no planejamento florestal. Uma exigência espacial amplamente conhecida impõe que áreas de colheita não sejam superiores a determinados limites, tipicamente de 30 a 80 hectares. A regulação dos impactos espaciais da colheita promove uma melhora da qualidade ambiental e sustentabilidade a longo prazo. Estes objetivos são alcançados através da minimização dos impactos ambientais e proporcionando habitat satisfatório para determinadas espécies.

Conforme ALONSO (2003), quando se utiliza a programação linear no planejamento florestal de longo e médio prazo, são necessárias algumas condições para assegurar a dispersão da colheita. O controle da dispersão da colheita deve ser feito para amenizar os efeitos da erosão, evitar grandes devastações e atender a aspectos legais no que diz respeito ao tamanho da colheita permitida. Estas condições são satisfeitas inserindo-se restrições de adjacência no modelo considerado, que irão excluir combinações de atividades indesejáveis em talhões adjacentes. Por exemplo, se considerarmos as unidades de trabalho delimitadas por polígonos, pode-se desejar que polígonos com lados comuns não sejam colhidos em um mesmo período, ou em um intervalo específico de tempo. Para o mesmo autor, o problema da consideração de restrições de adjacência no gerenciamento florestal tem sido progressivamente reconhecido como fundamental para ações locais específicas. O problema de adjacência é relevante por diversas razões, algumas delas ambientais. Com a consideração de restrições de adjacência pode-se evitar que grandes áreas sejam devastadas mantendo assim um certo equilíbrio ambiental observando nesta região uma paisagem em mosaico.

Segundo ÖHMAN e ERIKSSON (2010), a inclusão de questões espaciais no planejamento estratégico da colheita florestal aumenta sua complexidade. Uma das razões para este fato é que para se representar a agregação de unidades de manejo aos modelos há a necessidade de introduzir variáveis inteiras, uma vez que estas

especificam se será aplicado determinado regime de manejo a um talhão. Ainda, há a necessidade de se representar no modelo não apenas o estado de cada talhão, mas o estado dos talhões adjacentes também deve ser considerado.

De acordo com MISIR e KARAHALIL (2005), restrições de área máxima da colheita impedem a colheita de talhões adjacentes. As restrições de adjacência asseguram que a área máxima de colheita pré-determinada não seja excedida. Adicionalmente, há restrições que determinam um período mínimo de tempo entre a corte raso entre áreas adjacentes. As restrições de *green-up*, restringem tanto a área de colheita de uma floresta, como o período de tempo necessário para se realizar a colheita entre talhões adjacentes. Estas questões estão se tornando um componente usual nas práticas florestais de todo o mundo.

Por outro lado, a formação de blocos de colheita também é uma questão fundamental no planejamento da colheita. O tamanho, localização e período de colheita dos talhões afeta diretamente o desenvolvimento e estrutura da floresta. Considerações a respeito de áreas de abertura, proximidade com outras áreas de colheita, e período do corte são fatores críticos para assegurar os níveis de retorno econômico e de sustentabilidade da floresta. Com a finalidade de cumprir com várias restrições de colheita, o gestor encarregado da formação de blocos de colheita se depara com um grande desafio (WALTERS, 1996).

Conforme MURRAY e WEINTRAUB (2002), o agendamento da colheita florestal é um componente importante para o processo do manejo florestal. Neste sentido, os objetivos de instituições públicas e privadas normalmente diferem. Por um lado as instituições públicas apoiam a manutenção dos recursos naturais. Assim, as florestas e outros recursos naturais são insumos necessários para a nossa vida cotidiana (fornecendo madeira, óleos, carvão, etc.), mas estes recursos devem ser acessíveis para uso múltiplo, e devem estar em estado de sanidade adequado. Por outro lado, as companhias privadas objetivam a maximização econômica da produtividade usando estes recursos naturais. Isto normalmente é visto como uma atitude contrária à sustentabilidade dos recursos. Entretanto, a contínua viabilidade dos recursos naturais faz parte tanto dos interesses públicos

como privados. Com isso, os modelos de agendamento espacial da colheita se tornaram parte importante do planejamento florestal, pois é possível utilizá-los para balancear as questões de produtividade e preservação.

3.4.1 Restrições de adjacência

De acordo com BETTINGER (2009), restrições que consideram a adjacência de colheitas e o subsequente *green-up delay* dos talhões estão relacionadas diretamente com a justaposição espacial e temporal das áreas de colheita, e são talvez as restrições espaciais mais usadas no planejamento florestal atualmente. O controle do tamanho das áreas de colheita vem sendo considerado como uma maneira de beneficiar a vida selvagem, diversidade e aspectos estéticos das florestas. Entretanto existem algumas consequências quando as colheitas são espalhadas no espaço e no tempo, como o aumento nos custos das operações de colheita pela maior movimentação das máquinas florestais.

Para KONOSHIMA et al. (2011), as restrições de adjacência têm sido um assunto chave no agendamento da colheita nas últimas décadas, em decorrência das questões ambientais, ecológicas e paisagísticas. No manejo florestal, o conceito de adjacência mais frequentemente utilizado é aquele em que apenas unidades de manejo que tenham linhas adjacentes como vizinhos. Conforme os mesmos autores, os problemas de agendamento da colheita com restrições espaciais têm sido intensivamente analisados para resolver estes problemas, que levam em consideração a adjacência. Normalmente, estas restrições são utilizadas para prevenir áreas excessivamente grandes de colheita.

Conforme DEUSEN (2001), restrições relacionadas ao tamanho da área de corte raso em uma floresta são conceituadas como restrições de adjacência na literatura e muitos algoritmos foram desenvolvidos para resolver este tipo de problema, utilizando a programação linear inteira e inteira mista.

No momento da colheita, muitas vezes, se faz necessária a consideração de condições que assegurem a dispersão da colheita, seja esta necessidade baseada em aspectos ambientais ou para atender a exigências legais que regulamentam a extensão da floresta que pode ser colhida no período. Para assegurar estas condições precisa-se considerar no modelo de planejamento restrições de adjacência. Este tipo de restrição exige o uso de variáveis binárias, para que se possa garantir a adjacência. Para resolver este problema pode-se optar entre os métodos exatos de programação linear inteira binária ou a utilização de técnicas heurísticas (ALONSO, 2003).

Para CONSTANTINO et al. (2008), o conceito de adjacência pode ser expandido para atender as condições espaciais e resultados de interesse além do tamanho da área de colheita. Por exemplo, Rebain e McDill (2003) modelaram restrições de áreas mínimas de floresta madura para mitigar a fragmentação causada pelas restrições de adjacência tradicionais.

3.4.1.1 Modelos de adjacência

Para BOYLAND (2004), existem duas classes de modelos para o planejamento da colheita florestal: os modelos que criam unidades individuais de colheita como parte do processo de modelagem e os modelos que demandam que as unidades de planejamento sejam definidas antes da modelagem. Os modelos que criam as unidades de colheita no processo de planejamento são classificados como ARM (*Area Restriction Model*). Estes modelos permitem a formação blocos de talhões contíguos, desde que a área máxima estabelecida seja respeitada. Os modelos que requerem unidades de manejo definidas previamente são denominados URM (*Unit Restriction Model*). Estes modelos necessitam das unidades de manejo pré-definidas, para que posteriormente o gestor eleja as unidades a serem manejadas. As primeiras pesquisas realizadas a respeito do planejamento espacial da colheita utilizavam esta formulação, com modelos de simulação e algoritmos heurísticos.

Conforme Zhu et. al. (2007), a diferença entre as abordagens ARM e URM é a de que a abordagem URM controla a colheita de unidades de manejo adjacentes (sem considerar a sua área), durante o período de *green-up*, enquanto que a abordagem ARM permite que unidades de manejo adjacentes sejam colhidas durante o período de *green-up*, desde que a soma da área dos talhões adjacentes não exceda a área máxima de colheita assumida.

3.4.1.2 Unit Restriction Model (URM)

Segundo BETTINGER (2009), a abordagem URM é utilizada para controlar a alocação de atividades de colheita, proibindo que seja realizada a colheita em um local que toca fisicamente (ou próximo) outro local previamente selecionado para ser colhido ou que já tenha sido colhido, não importando o tamanho das duas unidades de manejo, e não importando quão grande ou pequena pode se tornar a área de corte raso.

Para STEIGUER (2003), a abordagem URM é aplicada quando as unidades de manejo são tão grandes, que a colheita de duas unidades adjacentes viola a restrição de área máxima de colheita. Com isso, se busca proibir a colheita de talhões contíguos em um mesmo ano do horizonte de planejamento.

De acordo com MURRAY e WEINTRAUB (2002) existem duas maneiras para impor restrições de área máxima na colheita florestal. A abordagem clássica é assumir que qualquer par de unidades adjacentes excede a área máxima determinada (Thompson et al.1973). Murray (1999) denomina a imposição desta restrição de colheita como *Unit Restriction Model* (URM). Segundo o autor, a chave para a abordagem URM ser aplicável é a definição apropriada das unidades de manejo (com áreas próximas à área limite).

As restrições URM podem ser escritas de várias maneiras diferentes. McDill e Braze (2000) identificaram 16 diferentes formas em que as restrições URM foram formuladas na literatura. O problema URM pode ser descrito como a escolha de um

grupo de unidades de manejo de uma floresta que serão colhidos, de maneira que duas unidades de manejo adjacentes não sofram o corte raso, maximizando o Valor Presente Líquido. Segundo o autor, o problema URM é semelhante ao bem estudado problema SSP (*Maximum Weight Stable Set Problem*). A equivalência entre os problemas pode ser constatada considerando um grafo em que as unidades de manejo são os nós e os laços são as adjacências entre as unidades. Se for considerado um peso para cada nó representando o Valor Presente obtido pelo corte da unidade de manejo, o problema é selecionar os nós não conectados com o peso total máximo (TÓTH, 2005). Segundo o autor, essa equivalência tem algumas implicações, uma delas é que os problemas URM são NP-Hard, o que significa que os tempos de solução aumentam exponencialmente com o aumento do tamanho do problema.

3.4.1.3 Area Restriction Model (ARM)

De acordo com GOYCOOLEA et al. (2005), a modelagem ARM é uma importante e complicada questão de planejamento da colheita florestal. Assim, a maioria das abordagens propostas para resolver os problemas que envolvem a modelagem ARM se baseiam em heurísticas. Adicionalmente, existem duas linhas de abordagens de soluções exatas à questão. A primeira foi proposta por McDill em 2002, e em seguida a segunda abordagem foi proposta por Crowe et al. (2003)

Segundo ZHU et al. (2007), a abordagem ARM permite que unidades adjacentes sejam colhidas durante o período de *green-up* desde que a área máxima de corte raso não seja superior à área máxima determinada. Para o mesmo autor a abordagem ARM apresenta formulação e resolução mais complexa do que a abordagem URM.

Segundo VIELMA et al. (2007), a abordagem ARM é um modelo que incorpora blocos de colheita à otimização. Para o mesmo autor, com o auxílio do Sistema de Informações Geográficas (SIG), é possível formar blocos de colheita,

adicionando unidades de manejo ao bloco, até que sua área se aproxime da área máxima de corte raso. Assim, após a formação destes blocos, caso um bloco seja colhido, evita-se que blocos contíguos sofram o corte raso no mesmo período.

Para CROWE (2004), na abordagem ARM os limites de todos os blocos de colheita potenciais não são predefinidos. Os polígonos podem ser agregados para formar blocos de colheita durante a busca pela solução ótima. O limite desta agregação é definido pela área máxima de colheita. Uma das vantagens da formulação ARM é que os blocos de colheita emergem em um contexto de um fluxo ótimo da produção de madeira, ao contrário dos blocos pré-definidos da abordagem URM em que dificulta a obtenção de um equilíbrio na produção.

Conforme GOMIDE et al. (2009), a resolução de problemas florestais envolvendo as restrições ARM pelo método exato só surgiu a partir do trabalho de McDill et al. (2002), estimulando assim a abertura para novas descobertas e desenvolvimento de mecanismos de resolução.

Inicialmente os problemas de formulação ARM eram considerados impossíveis de formular de maneira linear, apenas heurísticas eram empregadas para solucioná-los. Entretanto, McDill et al. (2002) identificaram 2 maneiras de formulação linear com métodos exatos para a formulação ARM. A primeira formulação é feita para permitir grupos de talhões contíguos a serem colhidos, desde que a soma de suas áreas não ultrapasse a área máxima de colheita. Os mesmos autores propuseram um algoritmo (*Path Algorithm*) que recursivamente enumera todos os grupos de talhões contíguos que ultrapassam a área limite. A desvantagem desta abordagem é que o número de restrições geradas cresce exponencialmente quanto menor a relação entre a área média dos talhões em relação à área máxima de colheita. Uma segunda formulação desenvolvida por McDill, Rebain e Braze (2002), é a chamada GMU (*Generalized Management Units*). Esta formulação usa variáveis separadas para cada uma das possíveis combinações de unidades de manejo contíguas dentro da floresta sem que a área limite seja excedida. Nesta formulação, as mesmas restrições utilizadas na abordagem URM podem ser utilizadas nos grupos GMU (TÓTH et al., 2006).

GOYCOOLEA et al. (2009) analisaram três formulações para resolução de problemas que envolvem a abordagem ARM. A primeira, denominada formulação Path, se baseia em enumerar todas as possíveis maneiras em que a colheita de blocos de talhões se torne infactível (violando a área máxima de corte raso), e definindo restrições que proíbem a colheita destes blocos. Outra formulação testada é a chamada *Cluster Packing Formulation*, que define variáveis para todos os blocos factíveis de colheita e definindo restrições que impeçam qualquer par selecionado sejam sobrepostos ou adjacentes. A terceira formulação testada foi a formulação *Bucket*, que consiste em definir *clusters* de talhões *a priori*, e então talhões são adicionados a este *cluster*. Esta formulação obedece algumas premissas: a) cada talhão deve fazer parte de apenas um cluster, b) a soma das áreas dos talhões presentes no *cluster* não devem exceder a área máxima e c) os *clusters* não devem ser adjacentes.

3.4.2 Corredores ecológicos

De acordo com MCDILL e REBAIN (2003), inicialmente as restrições de adjacência foram incluídas nos modelos de planejamento florestal para limitar a área máxima de corte raso, criando áreas de colheita pequenas e dispersas que criam uma diversidade de cobertura vegetal que era considerada benéfica à vida selvagem (Thompson et al. 1973). Ironicamente, enquanto as restrições de adjacência foram criadas inicialmente para beneficiar a vida selvagem, as pequenas áreas de colheita criadas por essas restrições podem ter um significativo impacto negativo sobre algumas espécies, em consequência da fragmentação da floresta.

Conforme ARAMBOUR (2003), o processo de fragmentação do habitat envolve três fatores, que possuem grande influência na fauna e flora que ocuparam originalmente grandes áreas contínuas de habitat selvagem. Primeiro, a fragmentação implica na divisão de uma grande área em numerosas pequenas áreas de habitat. Isto resulta em uma redução nos recursos e nas áreas de abrigo disponíveis. Portanto há uma redução no número de indivíduos que podem ocupar

este habitat. Segundo, a fragmentação das grandes áreas contínuas resulta em um significativo aumento nas áreas de borda. Estas áreas de borda possuem características microclimáticas diferentes das áreas do interior da floresta, podendo se tornar menos satisfatórias para as espécies se desenvolverem. Terceiro, a fragmentação resulta em uma divisão geográfica das áreas de floresta, que ficam dispersas entre áreas com outro uso de solo. Este efeito restringe drasticamente a mobilidade de certos organismos, isolando algumas populações.

Para mitigar estes problemas relacionados à fragmentação das áreas florestais e melhorar a qualidade do habitat para a fauna, uma das estratégias é a formação de corredores ecológicos e manutenção de áreas contíguas de floresta madura.

Corredores ecológicos são faixas físicas ou biológicas conectando áreas que permitem a movimentação das espécies (WINDT e SWART, 2008). Os corredores ecológicos têm por objetivo conectar núcleos de áreas naturais, e através desta conexão o tamanho efetivo de áreas fragmentadas é ampliado. Assim como os núcleos de vegetação, os corredores ecológicos variam em sua área e distribuição, mas em geral corredores mais largos possuem melhores condições para suportar maior diversidade de movimentações de fauna. Além da movimentação de grandes mamíferos e outras espécies, os corredores são essenciais à movimentação e manutenção da diversidade genética de todas as espécies, independente do seu tamanho. Até mesmo as plantas necessitam dos corredores para sua sobrevivência, pois através deles são disseminadas as sementes e o pólen (THOMSON, M. J. 2002).

Diversos estudos foram desenvolvidos para incorporar ao modelo de planejamento florestal as questões de qualidade do habitat para a vida selvagem. Essas questões foram incorporadas aos modelos de planejamento através de restrições de conectividade, visando formar uma área mínima de floresta madura ou corredores ecológicos, atendendo assim, os requisitos ambientais para garantir a manutenção da biodiversidade.

Segundo CARVAJAL et al. (2011), Caro et al. (2003) propuseram uma extensão do modelo ARM que considera a formação de áreas mínimas de floresta madura. McDill e Rebain (2003) desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista para a resolução de um modelo similar. Tóth et al. (2006) usaram uma abordagem para maximização do lucro e da área de floresta madura remanescente. Modelos propostos por Tóth e McDill (2008) e Öhman e Wikström (2008) para a minimização do perímetro da floresta, porém não garantindo a conectividade entre as áreas.

O modelo proposto por CARVAJAL et al. (2011) considera a conectividade em grafos, porém usando apenas variáveis para os nós. O modelo proposto apresenta grande versatilidade, podendo ser usado para problemas que necessitam de áreas únicas ou múltiplas e problemas que necessitam ou não da manutenção de um talhão específico para a área de floresta madura.

3.5 BIBLIOGRAFIA

ALONSO, L.R.L. **O Problema da consideração de restrições de adjacência em um planejamento florestal**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2003.

ANDERSSON, D. **Approaches to Integrated Strategic/Tactical Forest Planning**. Licentiate thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå, 2005.

ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FREIDL, R. A. **Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais**. R. Árvore, Viçosa-MG, v.28, n.2, p.207-217, 2004.

ARAMBOUT, J. P. 2003. **A Spatial Model to Estimate Habitat Fragmentation and its Consequences of Long-Term Survival of Animal Populations**. Online: <http://www.ucgis.org/summer03/studentpapers/jpaurambout.pdf>

BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest Management and Planning**. Academic Press, 2009, 342p.

BLUM, C.; ROLI, A. **Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison**. ACM Computing Surveys (CSUR) Volume 35 Issue 3, 2003 p. 268-308.

BORGES, J.; FALCAO, A. **Heurísticas para a integração de níveis estratégico e operacional da gestão florestal em problemas de grande dimensão**. SCIENTIA FORESTALIS n. 63, p. 94-102, jun. 2003.

BOYLAND, M., NELSON, J., and BUNNELL, F.L. 2004. **Creating zones for forest management: a simulated annealing approach**. Can. J. For. Res. 34: 1669–1682.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, K.J. **Decision methods for forest resources management**. Academic Press, 2003. 439p.

CARO, F.; CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; WEINTRAUB, A. **A 2-opt tabu search procedure for the multiperiod forest harvesting problem with adjacency, gree-up, old growth, and even flow constraints**. Forest Science 49 (5), 2003.

CARVAJAL, R.; CONSTANTINO, M.; GOYCOOLEA, M.; VIELMA, J. P.; WEINTRAUB, A. **Imposing Connectivity Constraints in Forest Planning Models**. Version October 2011. Disponível em: http://mgoycool.uai.cl/papers/11carvajal_submitted.pdf.

CHINNECK, J. W. **Practical Optimization: a Gentle Introduction**. 2004

CONEGLIAN, A.; BATISTA, W. R.; HOKAMA, L. F.; SANTIAGO, F. L. S., FENNER, P. T. **Avaliação do rendimento e custo operacional do forwarder na colheita do eucalipto em primeiro e segundo corte.** Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal e Engenharia Florestal -R.C.E.E.F., v.15, n.1, fev, 2010.

CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; BORGES, J. G. **A New Mixed-Integer Programming Model for Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions.** OPERATIONS RESEARCH Vol. 56, No. 3, May–June 2008, pp. 542–551.

CORNUEJOLS, G.; TÜTÜNCÜ, R. **Optimization Methods in Finance.** Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2005.

CORRAR, L. J.; THEÓPHILO, C. R. **Pesquisa Operacional para Decisão em Contabilidade e Administração.** 2ed, Editora atlas, 2008, 490p.

CROWE, K. **Incorporating Spacially Splicit Objectives Into Forest Management Planning.** Tese de Doutorado, The University of British Columbia, 2004.

CROWE, K.; NELSON, J.; BOYLAND, M. **Solving the area restricted harvest scheduling model using the branch and bound algorithm.** Can. J. For. Res. 33 (9), 2003.

DANTZIG, G. B. **Linear Programming and Extensions.** Princeton University Press, New Jersey, 1998, 633p.

DEUSEN, P. C. V. **Scheduling Spatial Arrangement and Harvest Simultaneously.** Silva. Fennica 35(1): 85–92, 2001.

FALCÃO, A. O.; BORGES, J. G. **Heuristics for integrating strategic and operational levels in large scale forest management systems.** Scientia Forestalis n.63, 2003.

FREITAS, K. E. **Análise técnica e econômica da colheita florestal mecanizada.** TCC Universidade Federal de Viçosa, 2005.

GARCIA, O. **LP and related approaches in forest planning.** IFORS'90 | 12th Triennial Conference of the International Federation of Operations Research Societies, Athens, Greece, 1990.

GOMIDE, L. R. **Planejamento Florestal espacial.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, 2009.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; LINDBECK, A. **Efeito das restrições de adjacência no planejamento florestal otimizado.** FLORESTA, Curitiba, PR, v. 40, n. 3, p. 573-584, jul./set. 2010.

GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A.; VIELMA, J. P.; WEINTRAUB, A.s **Evaluating Approaches for Solving the Area Restriction Model in Harvest Scheduling.** Forest Science, Volume 55, Número 2, Abril 2009, pp. 149-165(17).

GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A.T.; BARAHONA, F.; WEINTRAUB, A. **Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions: Exploring Exact Approaches.** Operations Research vol.53 p490-500, 2005.

HOFFMAN, K. L. **Combinatorial Optimization: Current Successes and Directions for the Future.** Journal of computational and applied mathematics, 2000, p. 341-360.

KONOSHIMA, M.; MARUSAK, R.; YOSHIMOTO, A. **Spatially constrained harvest scheduling for strip allocation under Moore and Neumann neighborhood adjacency.** JOURNAL OF FOREST SCIENCE, 57, 2011 (2): 70–77.

LAWLER, E. L. **Combinatorial Optimization: Networks and Matroids.** HOLT, RINEHART AND WINSTON, 1976, 374p.

LUENBERGER, D.G.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming.** Springer Press, 2008, 549p.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal.** Viçosa, Editora UFV, 2006.

MALKINOVSKI, R. A.; FENNER, P.T.; SCHACK-KIRCHNER, H.; MALINOVSKI, J. R.; MALINOVSKI, R. A. **Otimização da distância de extração de madeira com forwarder.** Sci. For., Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 171-179, set. 2008.

MARTELL, D. L.; GUNN, E. A.; WEINTRAUB, A. **Forest Management Challenges for Operational Researchers.** European Journal of Forest Research 104(1998), 1- 17.

MCDILL, M.; BRAZE, J. **Comparing adjacency constraint formulations for randomly generated forest planning problems with four age class distributions.** Forest Science v46 n(3): 608-618, 2000.

MCDILL, M.; REBAIN, S. **A Mixed-Integer Formulation of the Minimum Patch Size Problem.** Forest Science v49 n(4): 608-618, 2003.

MCDILL, M.; REBAIN, S.; BRAZE, J. **Harvesting scheduling with area based adjacency constraints.** Forest Science 48, 2002.

MCDILL, M. E., TÓTH, S. F.; GEORGE, S. **Strengthening Cover Inequalities for Area-Based Adjacency Formulations of Harvest Scheduling Models.** INFORMS Annual Meeting, Forestry Applications, Denver, 2004.

MILLS, S.D.; MCDILL, M. E. **An Adjacency Formulation Overcoming Modeling imitations Imposed by Shelterwood Silvicultural Treatments.** 2008.

MISIR, M.; KARAHALIL, U. **Overcoming spatial constrains in forest management using integer programming: a case study.** The 7 Balkan conference o operational research. Constanta, Maio de 2005, Romênia.

MURAY, A.; WEINTRAUB, A. **Scale and Unit Specification Influences in Harvest Scheduling with Maximum Area Restrictions.** Forest Science 48(4) 2002.

MURRAY, A.; GOYCOOLEA, M.; WEINTRAUB, A. **Incorporating average and maximum area restrictions in harvest scheduling models.** Can. J. For. Res. 34: 456–464 (2004).

NASCIMENTO, A. C.; LEITE, A. M. P., SOARES, T. S.; FREITAS, L. C. **Avaliação técnica e econômica da colheita florestal com feller-buncher.** Cerne, Lavras, v. 17, n. 1, p. 9-15, jan./mar. 2011.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L.O. **Aggregating harvest activities in long-term forest planning by minimizing harvest area perimeters.** Silva Fennica 44(1): 77–89, 2010.

ÖHMAN, K.; WINKSTRÖM. **Incorporating aspects of habitat fragmentation into long-term forest planning using mixed integer programming.** Forest Ecology and Management 255 (3-4), 2008.

RODRIGUES, F. L.; SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. E. M. **Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento.** Rev. Árvore vol.30 no.5 Viçosa Sept./Oct. 2006

ROTHLAUF, F. **Design of modern Heuristics Principles and Applications.** Springer, 2011, XI, 267p.

SCHNEIDER, P.R. **Manejo Florestal: Planejamento da Produção Florestal.** Santa Maria: CEPEF/FATEC/UFSM. 2009. 613p.

SILVA, J.C. **Fundamentos de Programação Linear-PL.** Boletim técnico: MS: 02/06 em 01/02/2006- Universidade Federal do Espírito Santo.

SIMÕES, D. **Avaliação econômica de dois sistemas de colheita florestal mecanizada de eucalipto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2008.

STEIGUER, J. E.; LIBERTI, L.; SCHULER, A.; HANSEN, B. **Multicriteria decision models for forestry and natural resources management: an annotated bibliography**. 07. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 2003. p. 32. (General Technical Report. NE-3).

THOMSON, M. J. **Cores and Corridors – The Importance of a Green System in Southern Ontario**. Disponível em:

<http://www.ontarionature.org/protect/PDFs/cores.pdf>. Acesso em: 28/07/2012.

TÓTH, S. F. **MODELING Timber and non-timber trade-offs in spatially-explicit forest planning**. Tese de doutorado. Pennsylvania State University, 2005.

TÓTH, S. F.; MCDILL, M. E.; REBAIN, S. **Finding the efficient frontier of a bi-criteria, spatially explicit, harvest scheduling problem**. Forest Science 52 (1), 2006.

TÓTH, S. F.; MCDILL, M. E. **Promoting large, compact mature forest patches in harvest scheduling models**. Env. Model. And Assess. 13 (1), 2008.

VANDERBEI, R. J. **Linear Programming: Foundations and Extensions**. Springer press, 2008, 467p.

VIELMA, J. P.; MURRAY, A. T.; RYAN, D. ; WEINTRAUB, A. **Improving Computational Capabilities for Addressing Volume Constraints in Forest Harvest Scheduling Problems**. European Journal of Operational Research, 2007, vol. 176, issue 2, pages 1246-1264.

WALTERS, K. R. **Defining adjacency and proximity of forest stands for harvest blocking**. GIS 96 Symposium, Vancouver, Fevereiro de 1996.

WEINTRAUB, A.; MURRAY, A. T. **“Review of combinatorial problems induced by spatial forest harvesting planning”**. Discrete Applied Mathematics, vol. 154, no. 5, pp. 867–879, 2006.

WINDT, H. J. V. D.; SWART, J. A. A. A. **Blackwell Publishing Ltd Ecological corridors, connecting science and politics: the case of the Green River in the Netherlands**. Journal of Applied Ecology 2008, 45, 124–132.

ZAGONEL, R. **Análise da densidade ótima de estradas de uso florestal em relevo plano de áreas com produção de Pinus taeda**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ZHU, J.; BETTINGER, P.; LI, R. **Additional Insight into the Performance of a New Heuristic for Solving Spatially Constrained Forest Planning Problems**. Silva Fennica 41(4): 687–698, 2007.

4 PLANEJAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA CONSIDERANDO ÁREAS MÁXIMAS OPERACIONAIS

RESUMO

Um dos maiores desafios com que se deparam os gestores na realização do planejamento da produção florestal se refere às questões logísticas da colheita. O planejamento operacional da colheita florestal deve ser realizado de forma a considerar as questões econômicas, buscando a maior rentabilidade possível advinda da floresta. Entretanto é necessário considerar as questões ambientais, respeitando a legislação, que determina uma área máxima contígua a ser colhida. Para resolver este tipo de problema as principais abordagens utilizadas são a abordagem URM e a abordagem ARM. A abordagem URM (*Unit Restriction Model*), impede que talhões contíguos sejam colhidos no mesmo ano do horizonte de planejamento, independentemente de sua área. A abordagem ARM (*Area Restriction Model*), forma blocos de colheita, desde que não ultrapassem uma área máxima. O objetivo do estudo foi realizar o planejamento florestal otimizado dos 236 talhões de uma floresta composta por *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.*, incorporando ao modelo restrições clássicas como área disponível, equilíbrio, entre outras, e as restrições de adjacência do tipo URM e ARM, avaliando seu efeito no resultado da otimização. Foram gerados cenários testando as funções objetivo de maximização da produção e maximização do VPL, as quais foram incorporadas as restrições. Através do resultado da otimização foi possível observar que os cenários mais rentáveis foram os cenários sem incorporação de restrições de adjacência e equilíbrio. A restrição de equilíbrio gerou perdas significativas ao VPL da floresta, e causou uma fragmentação nos talhões colhidos ao longo do horizonte de planejamento. A restrição URM foi eficiente na distribuição dos talhões a serem colhidos e sua incorporação ao modelo gerou um decréscimo de maior magnitude na função objetivo se comparado à restrição ARM. A restrição ARM se mostrou de formulação mais complexa comparada a abordagem URM, e sua incorporação gerou uma pequena redução no VPL. As duas abordagens se mostraram alternativas viáveis para tratar de problemas de logística, entretanto para a área em questão a abordagem ARM é a mais adequada.

Palavras chave: colheita florestal; restrições de área máxima; planejamento florestal

ABSTRACT

One of the biggest challenges that the managers face in the forest planning is related with the logistic question of forest harvest. The operational planning of forest harvest must consider the economic concerns, searching for the highest possible revenue from the forest. However is necessary to consider the environmental impact of this operation, respecting the policy, which limits the maximum harvest area. The main approaches to solve this sort of problem are ARM (Area restriction Model) and URM (Unit Restriction Model). The URM approach prevents contiguous management units to be harvested in a same period of the planning horizon. The ARM approach blocks contiguous management units respecting a limit area. The objective of this survey was to perform the optimized forest planning of 236 stands of a *Pinus sp.* and *Eucalyptus sp.* forest, incorporating classical constraints like available area, timber flow, among others, and ARM and URM constraints, evaluating their effects on the optimization results. Two objective functions were tested, the maximization of timber production and the maximization of NPV, the constraints were incorporated to each objective functions. Through the optimization results was possible to observe that the more profitable scenarios were the ones without adjacency and timber flow constraints. The timber flow constraint reduced significantly the NPV of the forest and caused a fragmentation of the management units during the planning horizon. The URM constraint was efficient on management units' fragmentation and generated a greater loss of NPV compared to the ARM constraint. The ARM constraint proved a more complex formulation and generated a small reduction of NPV. Both approaches resulted in viable alternatives for logistic problems; however, the ARM formulation was more suitable for the study area.

Key words: forest harvest; maximum area constraints; forest planning

4.1 INTRODUÇÃO

Uma das fases mais importantes do planejamento da produção florestal se refere ao agendamento espacial da colheita. A alocação adequada das máquinas florestais na área possibilita a obtenção de um manejo florestal satisfatório, conciliando os aspectos econômicos e ambientais da operação de colheita, garantindo a obtenção de todos os bens e serviços proporcionados pela floresta. Técnicas de otimização vêm sendo utilizadas com sucesso na área florestal desde a década de 60 e também vem se mostrando exitosas quando aplicadas aos problemas de adjacência relacionados à colheita florestal. Atualmente os problemas relacionados com o planejamento operacional da colheita ganharam complexidade, demandando considerações do tamanho e proximidade dos talhões, usualmente denominadas de restrições de adjacência (MCDILL e MANNING, 2011). Estas restrições de adjacência são formuladas através de duas abordagens principais, a abordagem URM (*Unit Restriction Model*) e a abordagem ARM (*Area Restriction Model*).

A abordagem URM (*Unit Restriction Model*) impede que talhões adjacentes sejam colhidos no mesmo ano do horizonte de planejamento, independentemente de sua área. A abordagem ARM (*Area Restriction Model*), leva em consideração a área dos talhões, permitindo que talhões contíguos sejam colhidos no mesmo ano do horizonte de planejamento desde que a área do bloco formado não exceda a área máxima de corte raso determinada (ZHU et al., 2007).

Devido à complexidade na resolução de problemas de planejamento espacial envolvendo a abordagem ARM, heurísticas foram propostas com objetivo de obter solução em um menor tempo de processamento. Entretanto com o avanço dos softwares de otimização, formulações exatas utilizando Programação Linear Inteira ou Programação Linear Inteira Mista foram propostas (GOYCOOLEA et al. 2005). Existem duas linhas de abordagens de soluções exatas à questão. A primeira é o *Path Algorithm*, proposto por McDill (2002), e em seguida a segunda abordagem foi proposta por Crowe et al. (2003).

McDill et al. (2002) citam 2 maneiras de formulação linear com métodos exatos para a formulação ARM. A primeira formulação é feita para permitir grupos de talhões contíguos serem colhidos, desde que a soma de suas áreas não ultrapasse a área máxima de colheita. Os mesmos autores propuseram um algoritmo (*Path Algorithm*) que recursivamente enumera todos os grupos de talhões contíguos que ultrapassam a área limite. A desvantagem desta abordagem é que o número de restrições geradas cresce exponencialmente quanto menor a relação entre a área média dos talhões e a área máxima de colheita. Uma segunda formulação desenvolvida por McDill, Rebain e Braze (2002), é denominada GMU (*Generalized Management Units*). Esta formulação usa variáveis separadas para cada uma das possíveis combinações de talhões contíguos dentro da floresta, sem que a área limite seja excedida. Nesta formulação, as mesmas restrições utilizadas na abordagem URM podem ser utilizadas nos grupos GMU.

Ambas as abordagens (URM e ARM) se baseiam na incorporação das restrições de adjacência ao modelo de planejamento otimizado e demandam a utilização de variáveis binárias, que são relacionadas a cada talhão. A incorporação destas variáveis binárias aumenta de forma significativa a complexidade do modelo de otimização, gerando problemas de PLIM (Programação Linear Inteira Mista).

O objetivo do presente estudo foi a incorporação de restrições de adjacência a um modelo de planejamento florestal, utilizando as abordagens ARM e URM. Também foram avaliados os resultados obtidos através de ambas abordagens no que se refere aos padrões de dispersão dos talhões colhidos e sobre a produção física e econômica advinda da floresta.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Área de estudo

Como área de estudo foi utilizada uma floresta de *Pinus spp* e *Eucalyptus spp*, localizada nos municípios de Bituruna e General Carneiro, Paraná, entre as coordenadas 26°13'58,31" e 26°22'5,634" S e 51°34'14,6 e 51°30'26,14" W (FIGURA 4.1). A área é composta por 236 talhões, sendo 18 talhões da espécie *Eucalyptus spp*, 21 talhões de *Pinus spp* e 197 talhões de *Pinus taeda*, com uma área total é de 2365,8 hectares. O clima segundo Köppen é classificado como Cfb: subtropical úmido mesotérmico, com verões frescos e invernos com ocorrências de geadas severas e frequentes.

Os talhões presentes na área apresentam amplitude de idade de 1 a 15 anos, com densidades de plantio de 1111, 1333 e 1666 árvores/ha. O número médio de adjacências por talhão é igual a 3.

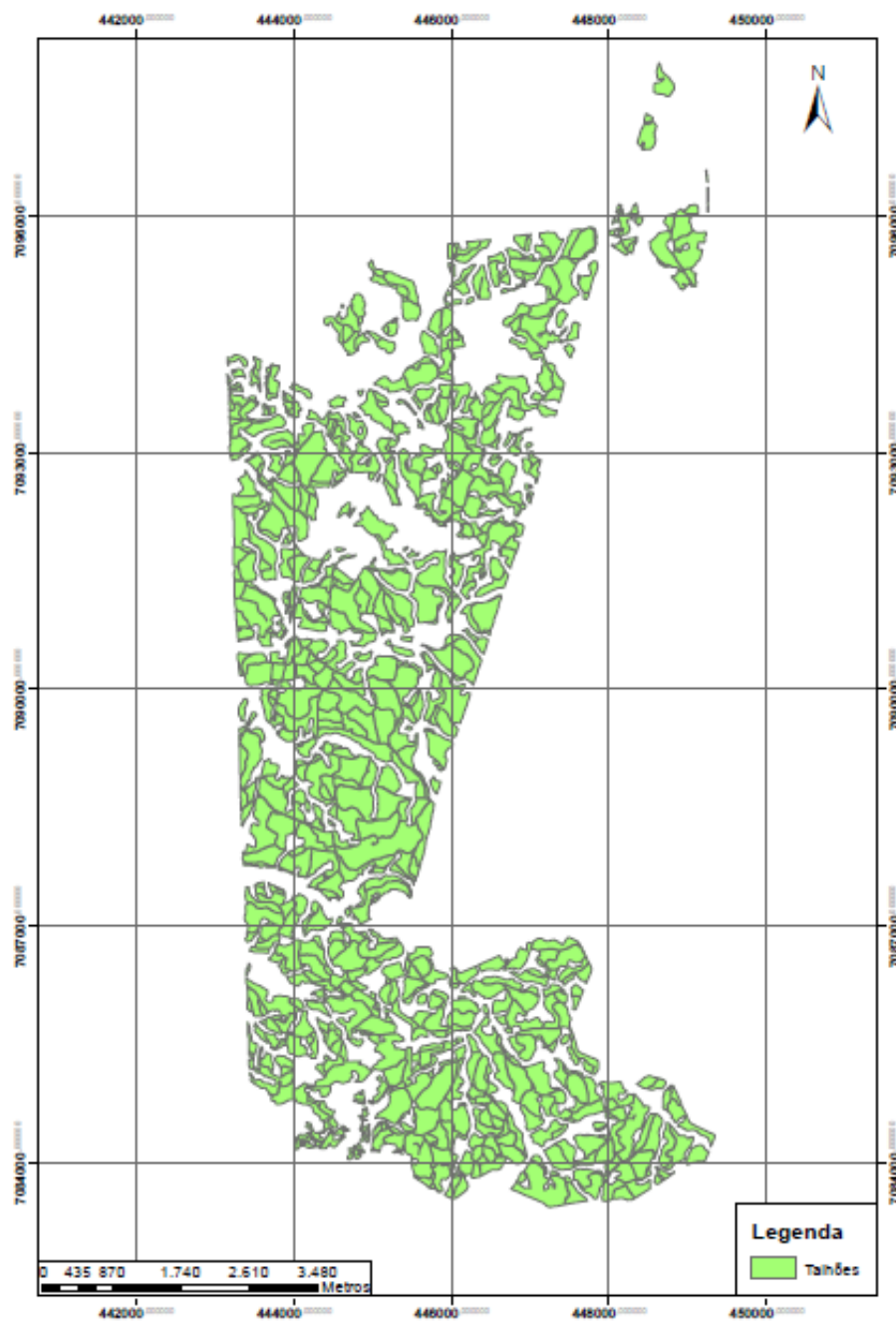


FIGURA 4.1 – ÁREA DE ESTUDO COM TALHÕES EM DESTAQUE

4.2.2 Restrições de adjacência

Conforme McNaughton et al. (2001), várias definições são utilizadas para determinar quando dois talhões são adjacentes. Mais frequentemente talhões adjacentes são definidos como tendo uma linha em comum. Ainda pode se considerar talhões adjacentes exigindo que possuam apenas um ponto em comum. Uma terceira abordagem é considerar adjacentes se qualquer ponto de um talhão esteja inferior a uma determinada distância de outro. Esta última alternativa é útil quando o objetivo das restrições de adjacência é a criação de corredores ecológicos. No presente estudo foi utilizada a abordagem tradicional, considerando adjacentes os talhões que possuem uma aresta em comum. Adicionalmente, visando conectar a área, os talhões sem nenhuma vizinhança foram considerados adjacentes ao talhão de centroide mais próximo, considerando a distância euclidiana entre os centroides e a ocorrência de obstáculos naturais, como rios por exemplo.

As restrições modelo ARM e URM foram obtidas a partir de uma lista de adjacência. A lista de adjacência é uma lista com número de linhas igual ao número de talhões, em que cada linha da lista contém os talhões adjacentes ao talhão correspondente à linha considerada (FIGURA 4.2).

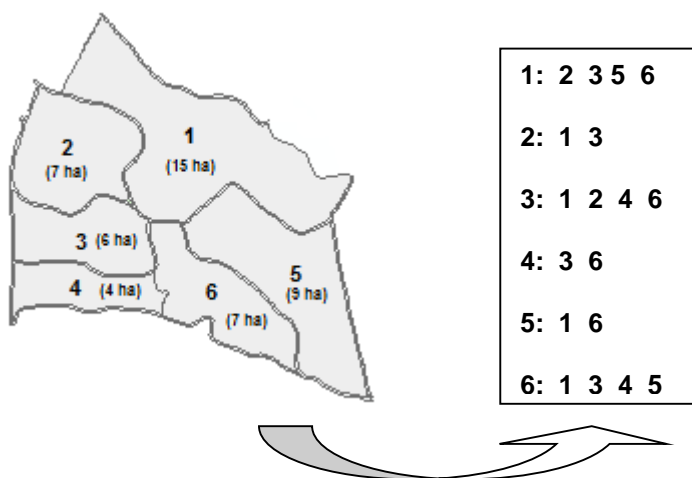


FIGURA 4.2 – EXEMPLO DE LISTA DE ADJACÊNCIA

A partir da lista de adjacência foram programadas rotinas em *Visual Basic* para a geração das restrições URM e ARM. Para a geração das restrições ARM foi utilizada uma rotina baseada no *Path Algorithm* proposto por McDill et al. (2002) para a formulação de problemas de agendamento da colheita com área máxima a partir de Programação Linear Inteira. O *Path Algorithm* (MCDILL et al., 2002) é descrito como segue:

1. Inicie com qualquer par de talhões adjacentes. Se o a área dos 2 talhões combinada é superior à área máxima permitida, escreva a restrição para esse par de talhões. Esse par de talhões forma o grupo inicial.
2. Selecione qualquer polígono adjacente ao grupo de talhões atual e adicione ao grupo.
3. Defina uma rede, baseada no grupo atual, com um nó correspondendo a cada talhão e um arco conectando cada par de talhões adjacentes. Identifique todos os possíveis caminhos originando do nó correspondente ao novo talhão no bloco. Termine um caminho quando a área acumulada dos talhões excede a área máxima ou quando não há mais talhões adjacentes ao caminho que ainda não fazem parte dele. Determine se o caminho gerado é redundante. Um caminho é redundante quando o grupo de talhões em um caminho anterior é um subconjunto do caminho atual. Caso o caminho não seja redundante, escreva a restrição.
4. Pare quando o grupo contém todos os talhões da floresta. Caso Contrário volte ao passo 2.

(MCDILL et al., 2002)

4.2.2.1 Restrições URM

As restrições do tipo URM visam evitar que talhões adjacentes sejam colhidos em um mesmo ano do horizonte de planejamento, não importando sua área. Para a formulação da restrição se introduz a seguinte variável de decisão:

$$x_{ij} \begin{cases} 1 & \text{caso o talhão } i \text{ seja colhido no ano } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Considerando $\delta(i)$ como o conjunto formado por todos os talhões adjacentes ao talhão i , temos o seguinte grupo de restrições:

$$\sum_{k \in \delta(i)} x_{kj} \leq n_i (1 - x_{ij}) \quad \forall i, \forall j \quad (4.1)$$

Onde:

x_{ij}, x_{kj} - variáveis binárias de decisão caso o talhão i ou k seja colhido no ano j

n_i - número de talhões adjacentes ao talhão i

$\delta(i)$ - conjunto de talhões adjacentes ao talhão i

Desta a forma a restrição (4.1) impõe que caso o talhão i seja designado para o corte raso em determinado ano do horizonte de planejamento, nenhum de seus vizinhos pode ser designado. Entretanto, é permitido que talhões adjacentes ao talhão i sejam colhidos em um mesmo ano do horizonte de planejamento, desde que não sejam adjacentes entre si.

4.2.2.2 Restrições ARM

As restrições ARM impedem que um grupo de talhões contíguos seja colhido no mesmo ano do horizonte de planejamento, caso a soma das áreas dos talhões presentes no bloco exceda a área limite. As restrições ARM são aplicadas quando a área dos talhões é pequena quando comparado ao limite de área determinado.

Neste caso, dois ou mais talhões contíguos não violam o limite estabelecido e se faz necessária a aplicação da abordagem ARM (MURRAY e WEINTRAUB, 2002).

Analogamente às restrições URM, as restrições ARM possuem a seguinte variável binária de decisão:

$$x_{ij} \begin{cases} 1 & \text{caso o talhão } i \text{ seja colhido no ano } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Considerando λ o conjunto de todos os blocos de talhões que imediatamente excedem a área limite e dado um bloco de talhões $\lambda(i) \in \lambda$ e ainda, sendo $w(i)$ o número de talhões em $\lambda(i)$, temos o seguinte conjunto de restrições:

$$\sum_{i \in \lambda(i)} x_{ij} \leq w(i) - 1 \quad \forall j, \forall \lambda(i) \quad (4.2)$$

Neste caso, o conjunto de restrições (4.2), impede que qualquer bloco de talhões contíguos que viole a área máxima seja colhido em um mesmo ano do horizonte de planejamento. Entretanto, permite que qualquer combinação de talhões dentro do bloco, com área inferior à área limite seja colhido em um mesmo ano do horizonte de planejamento.

4.2.3 Modelo de Otimização

Neste contexto, temos o seguinte problema de otimização, considerando áreas máximas operacionais:

Maximizar

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} c_{ij} x_{ij} \quad (4.3)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^{HP} x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (4.4)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq 0.9 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq 1.1 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (4.6)$$

$$\text{URM} \quad \sum_{k \in \delta(i)} x_{kj} \leq n_i (1 - x_{ij}) \quad \forall i, j = 1 \dots 10 \quad (4.7)$$

$$\text{ARM} \quad \sum_{i \in \lambda(i)} x_{ij} \leq w(i) - 1 \quad \forall \lambda(i), j = 1 \dots 10 \quad (4.7')$$

(Adaptado de Carvajal et al., 2010)

$$x_{ij}, x_{kj} \in \{0, 1\} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (4.8)$$

Onde:

N : Número de talhões da floresta

HP : Número de anos do horizonte de planejamento

c_{ij} : VPL gerado pelo talhão i caso seja colhido no ano j

x_{ij}, x_{kj} : variável binária de decisão que assume valor 1 caso o talhão i ou k seja colhido no ano j

v_{ij} : volume gerado pelo talhão i no ano j

ai : área do talhão i (ha)

- n_i : coeficiente que indica o número de talhões adjacentes ao talhão i
- $\delta(i)$: conjunto de talhões adjacentes ao talhão i
- $\lambda(i)$: bloco de talhões i com área superior à área limite
- $w(i)$: número de talhões em $\lambda(i)$

A função (4.3) representa a função objetivo do modelo, a maximização do Valor Presente Líquido da floresta. Uma vez que a floresta representa um capital e o crescimento pode ser considerado como a taxa de retorno deste capital, a utilização de critérios econômicos é essencial em modelos de otimização. O VPL florestal representa estes critérios econômicos. No presente problema de otimização a taxa de desconto utilizada foi igual a 10% ao ano.

A equação (4.4) garante que apenas um regime de manejo seja aplicado a cada talhão ao longo do horizonte de planejamento. As equações (4.5) e (4.6) são as restrições de equilíbrio do modelo e visam evitar grandes flutuações no suprimento de madeira ao longo do HP. No modelo em questão, foi estabelecido um limite de 10% de variação do volume a cada ano do HP, em relação ao volume colhido no primeiro ano.

A equação (4.7) representa o conjunto de restrições URM e a equação (4.7'), o conjunto de restrições ARM. Foram testados cenários com diferentes valores para o limite de área, com objetivo de avaliar o efeito das mesmas sobre o volume e VPL da floresta. Conjuntos de restrições ARM para limites de área iguais a 40, 50, 60 e 70 ha foram incluídos no modelo.

A expressão (4.8) garante que as variáveis x_{ij} assumam apenas valores binários.

O horizonte de planejamento adotado foi de 16 anos, em regimes de manejo sem desbaste. Inicialmente foram testados cenários sem restrições de adjacência, sem e com restrições de equilíbrio da produção. O mesmo procedimento foi

adotado, incluindo as restrições de adjacência aos primeiros 10 anos do HP, com e sem restrições de equilíbrio, totalizando 12 cenários (TABELA 4.1).

TABELA 4.1 – CÊNARIOS TESTADOS

Cenário	Nome	Restrições
1	Livre	4.4, 4.8
2	URM	4.4, 4.7, 4.8
3	ARM 40 ha	4.4, 4.7', 4.8
4	ARM 50 ha	4.4, 4.7', 4.8
5	ARM 60 ha	4.4, 4.7', 4.8
6	ARM 70 ha	4.4, 4.7', 4.8
7	Equilíbrio	4.4, 4.5, 4.6, 4.8
8	URM e equilíbrio	4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8
9	ARM 40 ha e equilíbrio	4.4, 4.5, 4.6, 4.7', 4.8
10	ARM 50 há e equilíbrio	4.4, 4.5, 4.6, 4.7', 4.8
11	ARM 60 ha e equilíbrio	4.4, 4.5, 4.6, 4.7', 4.8
12	ARM 70 ha e equilíbrio	4.4, 4.5, 4.6, 4.7', 4.8

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os cenários de planejamento foram gerados por meio do software Optimber-LP e em seguida os modelos de otimização foram resolvidos através do software

Gurobi 5.5 em computador com processador Intel® Core™ Duo CPU 2,93 GHz e 4Mb de memória RAM. Os resultados obtidos após 1,5 horas de processamento são demonstrados a seguir:

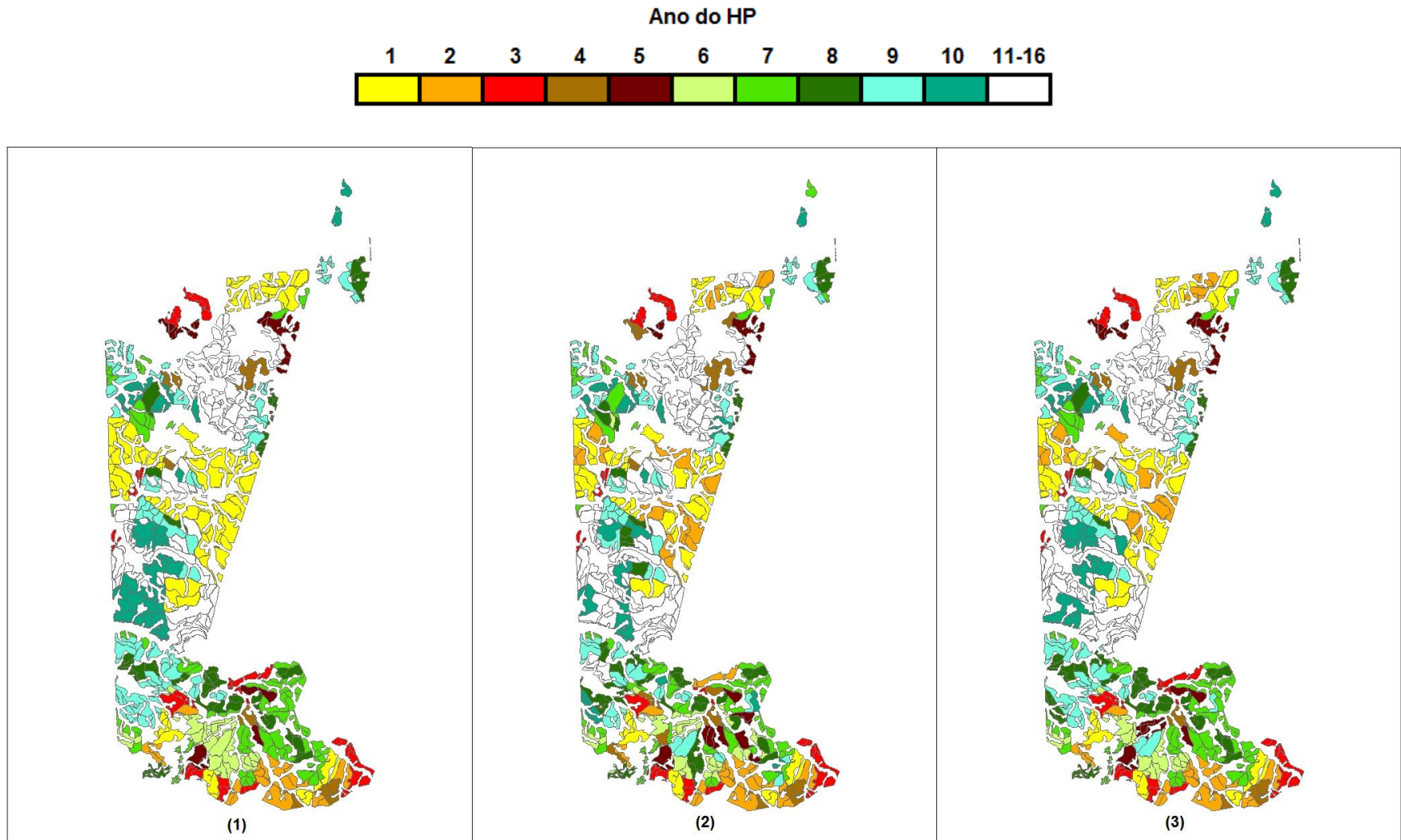


FIGURA 4.3 – CONTINUA...

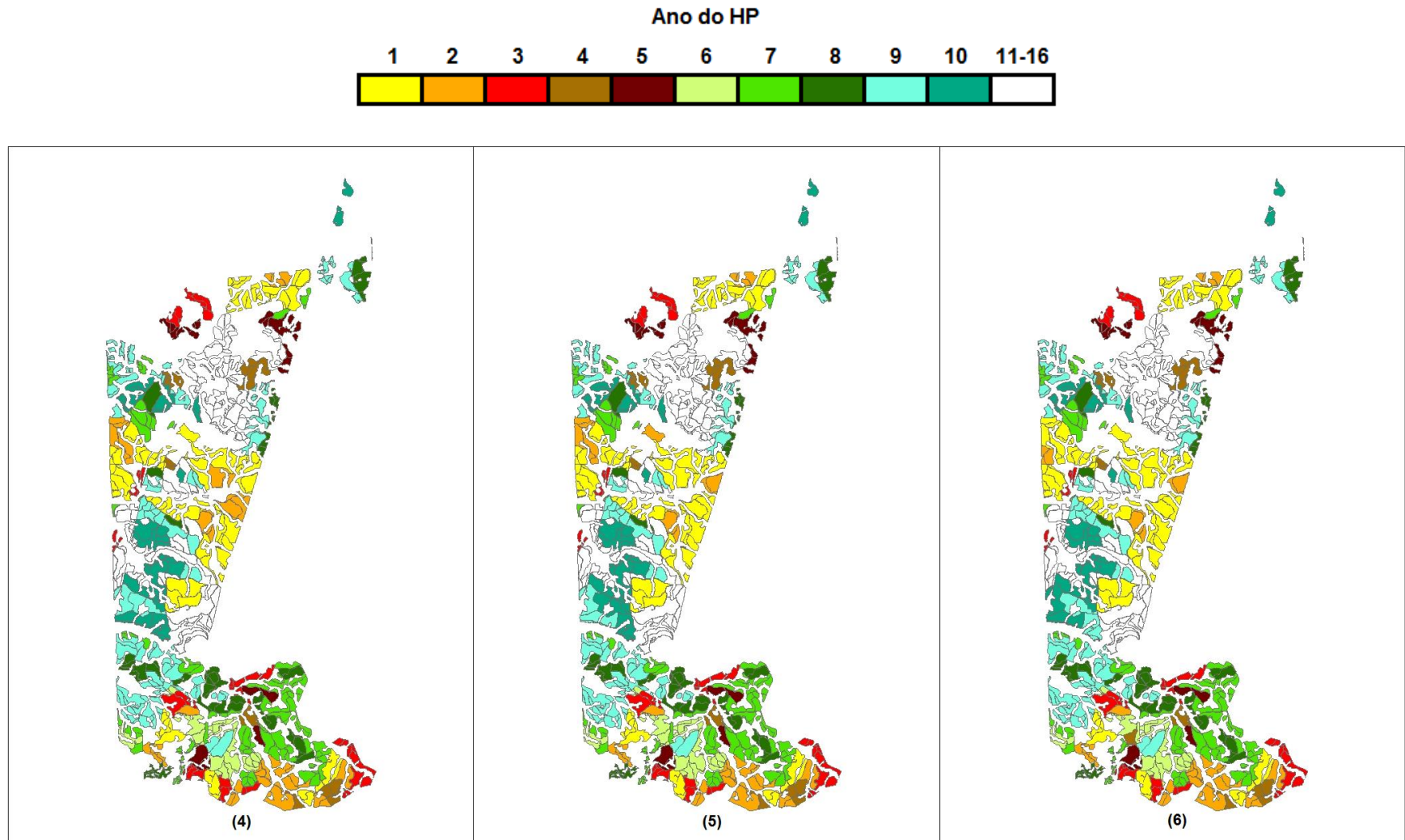


FIGURA 4.3 – AGENDAMENTO DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS SEM RESTRIÇÕES DE EQUILÍBRIO

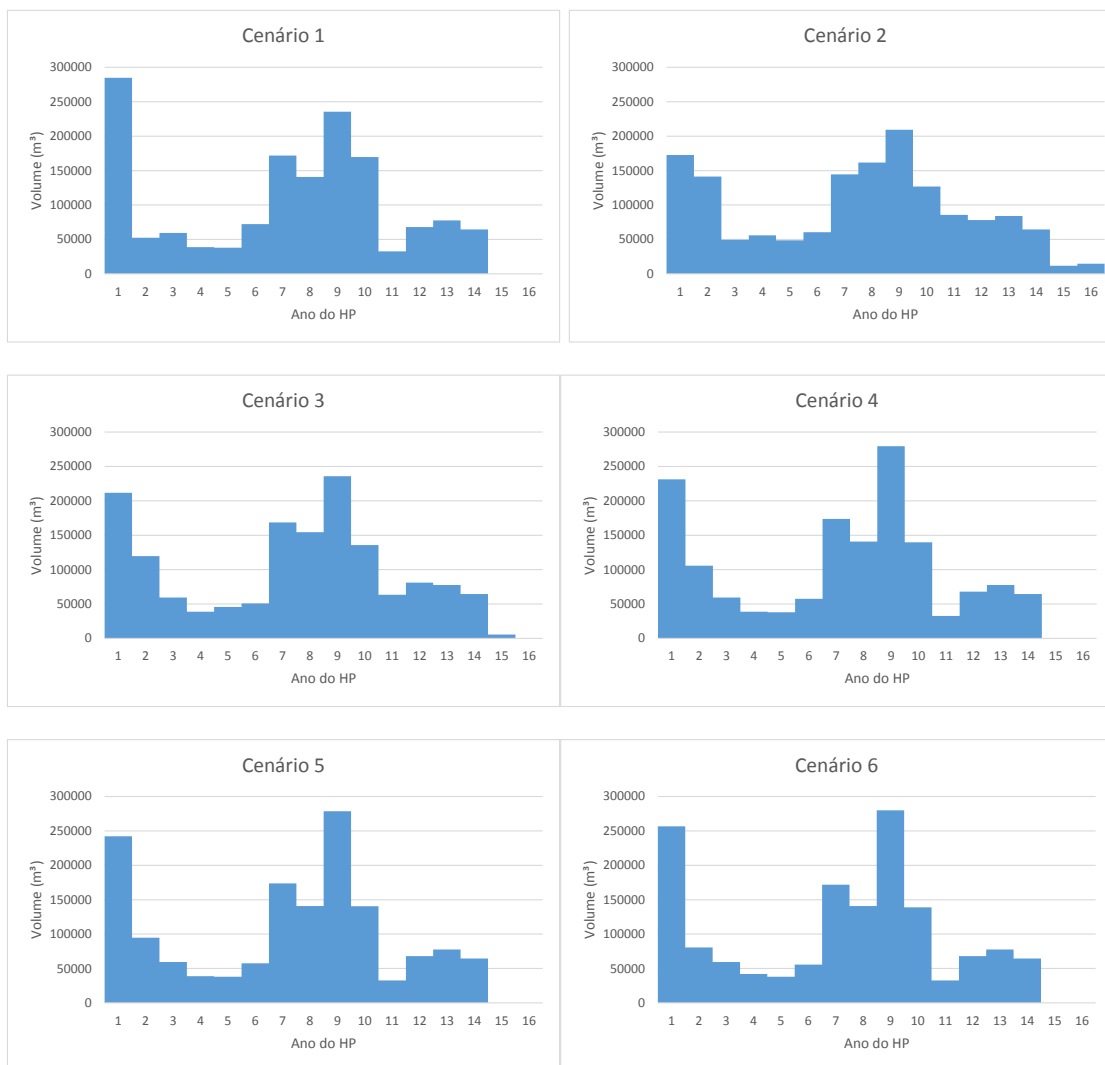


FIGURA 4.4 – VOLUME DE COLHEITA ANUAL NOS CENÁRIOS SEM RESTRIÇÕES DE EQUILÍBRIO

Com base na FIGURA 4.3, representando os cenários em que não foi aplicada a restrição de equilíbrio, é possível observar que grande parte dos talhões foi colhida no ano 1 do HP, para o Cenário 1. A função objetivo de maximização do VPL leva em consideração critérios econômicos na resolução. Considerando que o valor da madeira não é o mesmo no início e no final do horizonte de planejamento, é aplicada uma taxa de desconto ao valor da produção esperada para cada ano. Assim a maximização do VPL tende a antecipar o corte, visando um retorno mais rápido do capital.

Na FIGURA 4.4 é possível observar o mesmo comportamento para os demais cenários, com um pico de produção ao ano 1 e ao ano 9 do HP. Entretanto, no Cenário 2, em que a restrição URM foi aplicada, e no Cenário 3, em que a restrição ARM com área máxima de 40 ha foi aplicada, os picos de produção foram suavizados. Por se tratarem dos conjuntos de restrições mais impeditivas com relação à colheita, a impossibilidade da colheita de um bloco de talhões fez com que o agendamento de talhões agendados para colheita no primeiro ano no Cenário 1 fossem transferidos para o segundo ano, causando uma suavização dos picos de produção. À medida que a área máxima foi aumentada, ou seja, o conjunto de restrições se tornou menos impeditivo, o resultado obtido se aproximou do Cenário livre (Cenário 1). No cenário 6 é possível observar a transferência de alguns talhões para o ano 2, quando comparado ao resultado obtido no cenário 1, em virtude do bloco de colheita no cenário livre exceder a área máxima.

Com relação a aplicação das restrições URM (Cenário 2) pode ser observado que o objetivo foi atingido, e a colheita de talhões adjacentes foi evitada em um mesmo ano do horizonte de planejamento, causando uma fragmentação na colheita dos talhões. Segundo Murray e Weintraub (2002), a modelagem URM é eficiente quando se objetiva apenas a diminuição da extensão da colheita, visando diminuir impactos ambientais. Entretanto, a fragmentação causada pela restrição URM tem influência nos custos da colheita. Uma vez que os talhões a serem colhidos encontram-se dispersos, há a necessidade de uma maior movimentação das máquinas florestais entre os talhões, demandando um maior tempo para realizar a operação, bem como aumentando o consumo de combustível e os gastos relacionados à manutenção das máquinas.

É possível encontrar na literatura alguns métodos que visam mitigar o aumento de custos de colheita causados pela incorporação das restrições URM no modelo de otimização. As metodologias consistem de maneira geral em formar blocos de colheita agrupando os talhões de forma aleatória. Murray e Weintraub (2002) indicam duas metodologias para a formação de blocos, a metodologia *Thiessen* e a metodologia *Block Building*.

Nos cenários em que foi aplicada a restrição ARM, nota-se que a mesma foi eficiente em evitar a colheita de blocos de talhões contíguos que excedem as áreas limite determinadas. Nota-se que há a ocorrência de áreas contíguas de colheita, formando blocos e, conseqüentemente, uma menor movimentação das máquinas entre os talhões, reduzindo os custos da operação de colheita. Conforme descrito por Murray e Weintraub (2002), a maior liberdade para seleção dos talhões a serem colhidos confere à abordagem a ARM a possibilidade de se obter melhores resultados, se comparados à abordagem URM.

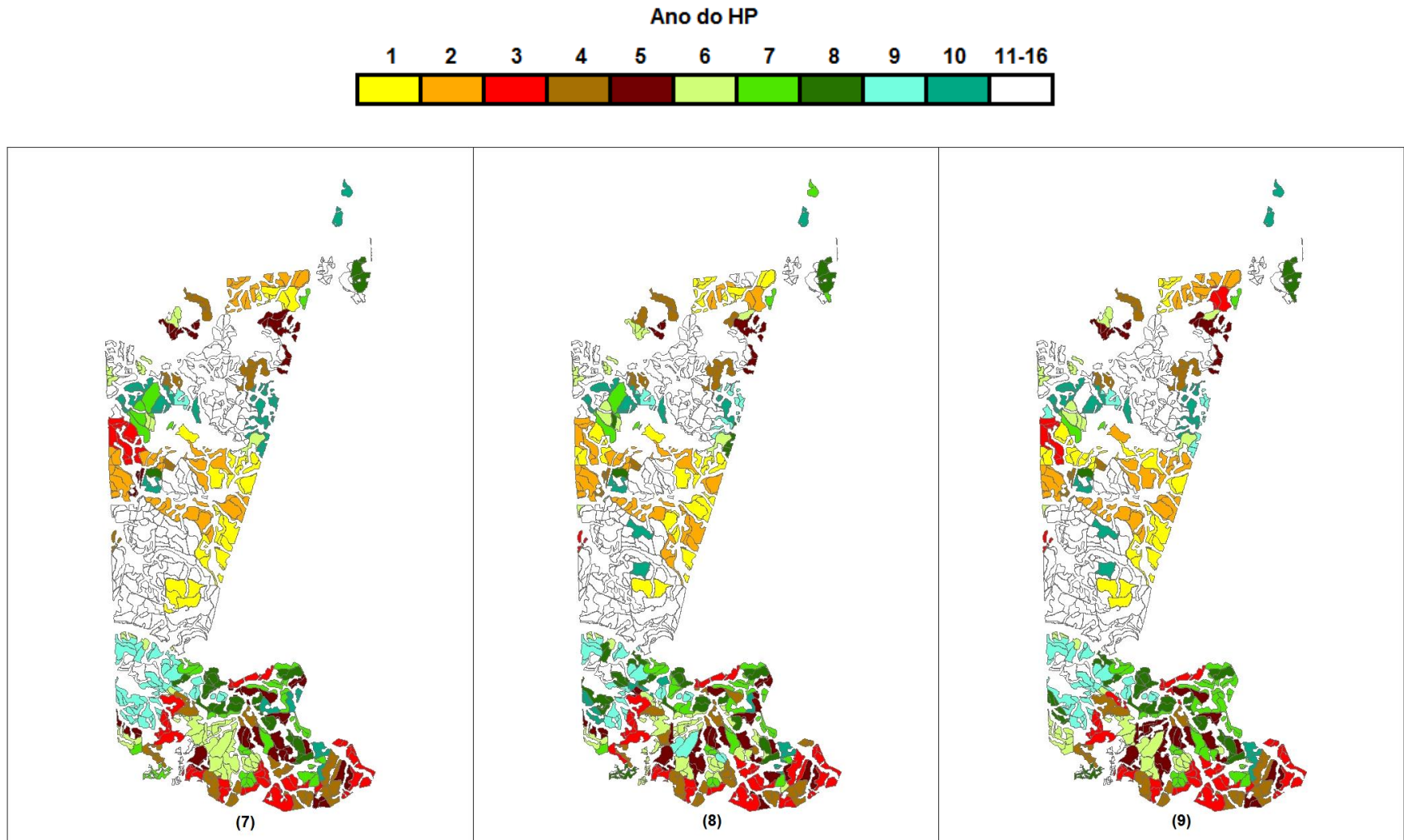


FIGURA 4.5 – CONTINUA...

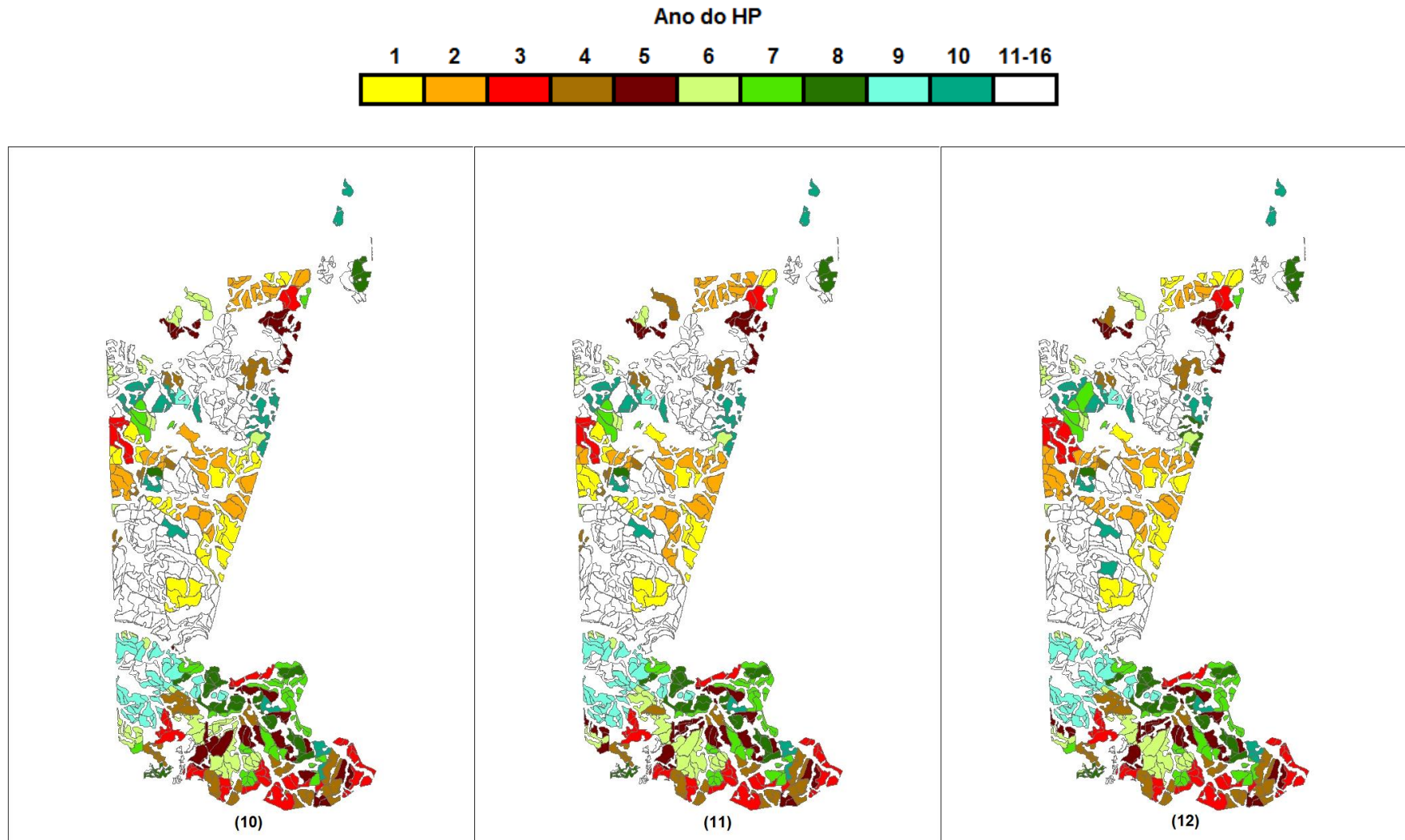


FIGURA 4.5 – AGENDAMENTO DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS COM RESTRIÇÕES DE EQUILÍBRIO



FIGURA 4.6 – VOLUME DE COLHEITA ANUAL NOS CENÁRIOS COM RESTRIÇÕES DE EQUILÍBRIO

Com base na FIGURA 4.6, foi possível observar que nos cenários em que foi aplicada a restrição de equilíbrio pode ser constatado que a mesma evitou a retirada de um grande volume no início do horizonte de planejamento. Os picos de produção nos primeiros anos do HP e no ano 9 foram suavizados, atendendo ao limite de variação de 10% imposto pela restrição.

Outro efeito da restrição de equilíbrio foi a distribuição dos talhões a serem colhidos (FIGURA 4.5), comparados aos cenários em que a mesma não foi aplicada.

Pode ser observado novamente uma aproximação do agendamento da colheita à medida que o limite de área foi aumentado. O cenário 7, em que nenhuma restrição de adjacência foi aplicada, apresenta a formação de algumas áreas contíguas de colheita, principalmente no primeiro ano do HP. Ainda, se observa que em alguns casos, como no primeiro ano do HP, o bloco formado é relativamente grande, superior a 70 ha. Desta forma, com o aumento do limite de área, se possibilita a formação de blocos de talhões contíguos maiores, obtendo-se uma resposta mais próxima do cenário sem restrições de adjacência.

Vielma et al. (2007) obtiveram resultados semelhantes na aplicação de restrições de equilíbrio em uma floresta no norte da Califórnia. Segundo os autores o efeito de fragmentação causado pela restrição de equilíbrio é explicado pelo fato de que com a maximização do VPL, se a taxa de desconto aplicada for maior do que a taxa de crescimento da floresta, as restrições de volume evitarão a realização do corte raso no maior número de talhões possíveis durante os períodos iniciais.

Bettinger et al. (2005) estudaram uma área florestal na região da costa do Oregon, analisando cenários com imposição de restrições de adjacência e equilíbrio. Segundo o autor é possível obter um maior volume de madeira através do relaxamento da restrição de equilíbrio da produção. Outra variável que afetou de forma significativa o volume submetido à restrição de equilíbrio foi a idade mínima de corte raso, havendo uma redução de 26% do volume com o aumento da idade mínima de corte raso de 35 para 40 anos. Adicionalmente a redução da área máxima de colheita permitida causou uma redução no volume colhido na ordem de 4% quando a área máxima de colheita foi reduzida de 48,6ha para 24,3ha.

TABELA 4.2 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA CADA CENÁRIO

CENÁRIO	VOLUME (M³)	VPL (R\$)	VARIAÇÃO (%)	NÚMERO DE RESTRIÇÕES
1	1.506.906,6	82.378.134,05	-	82.712
2	1.509.849,6	79.689.160,42	-3,37	85.072
3	1.513.623,6	81.435.064,31	-1,16	114.382
4	1.507.816,0	81.958.263,98	-0,51	142.852
5	1.507.911,1	82.041.091,01	-0,41	207.822
6	1.507.102,3	82.143.186,76	-0,29	325.452
7	1.609.073,3	80.198.885,85	-2,64	82.742
8	1.588.600,3	78.699.174,53	-4,46	85.102
9	1.600.965,8	79.873.095,9	-3,14	114.412
10	1.610.961,4	80.178.984,48	-2,66	145.882
11	1.611.201,5	80.190.949,23	-2,65	207.852
12	1.602.306,2	80.164.189,00	-2,68	325.482

A aplicação da restrição URM (Cenários 2 e 8) tiveram o maior efeito sobre à função objetivo de maximização do VPL, gerando uma redução de 3,37% sem a restrição de equilíbrio e 4,46% no caso em que a restrição de equilíbrio foi aplicada (TABELA 4.2). Segundo Gomide et al. (2010), estudando uma área de 52 talhões no município de Caçapava (São Paulo), a incorporação de restrições de adjacência URM no planejamento da área gerou uma redução de 3,74% no VPL e perdas volumétricas inferiores a 3%. A aplicação da restrição ARM obteve um resultado mais eficiente se comparados à restrição URM. No caso mais restritivo, com área limite de 40 ha a perda de VPL foi de 1,16%. Murray e Weintraub (2002) obtiveram valores para a abordagem ARM 16% superiores à abordagem URM. Estas diferenças podem estar relacionadas às características da área de estudo, bem como a área limite determinada. A área em questão apresenta talhões dispersos no

agendamento da colheita para os cenários sem restrições de adjacência. Com isso, as diferenças entre as duas abordagens tendem a ser menores

McDill e Manning (2011) apontam que a função objetivo teve valores superiores quando formulada com restrições ARM comparada aos valores obtidos com a formulação URM. Os autores ainda destacam que as diferenças podem ser substanciais, especialmente em florestas inequidêneas. Em uma floresta jovem de 50 talhões o valor da função objetivo caiu de \$ 227.049,86 com a formulação *Path* para \$ 183.025,95 em uma formulação Maximal Clique. Em uma floresta com 100 talhões maduros o valor da função objetivo caiu de \$ 781.287,89 em uma formulação GMU, para \$ 774.101,31 utilizando uma formulação URM.

Zhu et al. (2007) avaliaram duas áreas com 2942 e 5821 ha, com uma área média dos talhões de 10,5 ha para a primeira área e 12,2 ha para a segunda área, para um horizonte de planejamento de 20 anos a uma taxa de desconto de 6%. Os resultados indicaram que a incorporação de restrições de adjacência gerou um decréscimo de 1 a 3,5% no Valor Presente da floresta para cada cenário.

Considerando os resultados da TABELA 4.2, ainda foi possível observar que com o aumento do limite de área o VPL obtido foi superior. No cenário 3, com um limite de 40 ha, a redução do VPL foi igual a 1,16%, ao passo que no cenário 6, com um limite de 70 ha, o VPL foi reduzido em apenas 0,29%. Murray et al. (2004) avaliaram o efeito de restrições ARM na floresta nacional El Dorado localizado no norte da Califórnia. Os autores analisaram o efeito do aumento da área limite de corte raso sobre o resultado da otimização. Segundo o autor, o aumento da área limite é acompanhado por um acréscimo no número de blocos possíveis de colheita e um incremento no valor da função objetivo. O aumento da área limite de 80 para 100 acres acarretou em um valor 10% maior da função objetivo.

A restrição de equilíbrio afetou significativamente o VPL da floresta. Foi observada uma redução de 2,64% no VPL comparando-se os cenários 1 e 7. A inclusão da restrição de equilíbrio implica na colheita de talhões fora do seu período ótimo para a maximização do VPL. Como foi observado, no cenário 1, grande parte

dos talhões foram agendados para a colheita no ano 1, gerando um pico de produção. Com a restrição de equilíbrio, parte destes talhões foram reagendados para os anos subsequentes, reduzindo o VPL. Quando aliada às restrições de adjacência (Cenários 8 à 12), as perdas foram ainda maiores, chegando a 3,14% no cenário 9. Com a incorporação das restrições de adjacência o modelo se torna ainda mais restritivo, causando a redução do valor da função objetivo.

As restrições de adjacência, além de terem efeito sobre os valores da função objetivo, causam um aumento significativo na complexidade do modelo de otimização. Tal comportamento se deve ao fato da inclusão de grande número de restrições, principalmente quando a abordagem ARM é utilizada.

A abordagem ARM tem uma formulação mais complexa se comparada à abordagem URM, demandando algoritmos mais elaborados para a formulação. Tendo em vista que a abordagem URM consiste em apenas evitar que dois talhões contíguos sejam colhidos no mesmo ano, bastando buscar na lista de adjacência os pares de talhões adjacentes. Por outro lado para a abordagem ARM, é necessária a determinação de todos os blocos possíveis que ultrapassem a área limite, necessitando a avaliação de um grande número de vizinhanças entre os talhões, determinando todas as combinações possíveis destes talhões que violem a área máxima ou no caso de uma formulação que utiliza os blocos factíveis, a identificação de todos os blocos com área inferior à área limite. Ainda, a abordagem ARM gera um maior número de restrições do que a abordagem URM, como é possível observar na TABELA 4.2, com o cenário 2 (URM) com 85.072 restrições, ao passo que o cenário 6 (ARM 70 ha) com 325.482 restrições. Bettinger (2008) destaca que a abordagem ARM pode requerer um maior número de restrições para permitir o controle de colheitas adjacentes. Quanto maior a área máxima de corte raso permitida, comparada ao tamanho médio dos talhões, maior o número de restrições e de redundâncias. Goycoolea et al. (2009) avaliaram o efeito do aumento da área máxima de colheita sobre o número de restrições para uma floresta de 1363 talhões, localizada no norte da Califórnia. Segundo o autor o aumento da área máxima de colheita em 60% gerou um aumento de 500% no tamanho do modelo,

pois com o aumento do limite da área o número de combinações para formar os blocos de colheita também aumenta de forma significativa.

4.4 CONCLUSÕES

Cenários sem imposição de restrições são mais rentáveis. A ausência de restrições permite uma maior liberdade na escolha dos talhões a serem colhidos, conferindo um melhor resultado do ponto de vista econômico.

A restrição URM é eficiente na distribuição dos talhões a serem colhidos, evitando que talhões contíguos fossem cortados no mesmo ano do HP. Entretanto deve-se considerar o aumento no custo da colheita acarretado pela sua incorporação no modelo. Adicionalmente, outro efeito negativo da restrição URM se refere à dificuldade de manutenção do fluxo constante de madeira, uma vez que a área dos talhões não é considerada na restrição, e talhões com áreas diferentes possuem estoques diferentes.

Considerando as características da área em questão, a abordagem ARM se mostra mais adequada ao modelo de otimização, pois os talhões apresentam área pequena quando comparadas às áreas limite utilizadas. Desta forma a agregação dos talhões em blocos se torna interessante do ponto de vista financeiro.

A tendência em se retirar um grande volume de madeira nos primeiros anos do horizonte de planejamento é indesejável. Este comportamento causa falta de madeira em alguns períodos e excesso de madeira em outros. Este excesso pode não ser absorvido pelo mercado ou afetar o preço do produto. Neste sentido, a inclusão da restrição de equilíbrio da produção é essencial para evitar este tipo de comportamento.

A incorporação de restrições de adjacência ao modelo de planejamento causa um aumento significativo na complexidade do modelo, consequência da introdução de variáveis binárias e um aumento no número de restrições.

4.5 BIBLIOGRAFIA

BETTINGER, P.; LENNETTE, M.; JOHNSON, N.; SPIES, T. A. **A hierarchical spatial framework for forest landscape planning**. Ecological Modelling 182 (2005) 25-48.

BETTINGER, P. **Tabu search experience in forest management and planning**. Outubro, 2008, I-Tech, Viena, Austria.

CARVAJAL, R.; CONSTANTINO, M.; GOYCOOLEA, M.; VIELMA, J. P.; WEINTRAUB, A. **Imposing connectivity constraints in forest harvest scheduling**, 2010.

CROWE, K.; NELSON, J.; BOYLAND, M. **Solving the area restricted harvest scheduling model using the branch and bound algorithm**. Can. J. For. Res. 33 (9), 2003.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; LINDBECK, A. **Efeito das restrições de adjacência no planejamento florestal otimizado**. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 40, n. 3, p. 573-584, jul./set. 2010.

GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A. T.; VIELMA, J. P.; WEINTRAUB, A. **Evaluating approaches for solving the area restriction model in harvest scheduling**. Forest Science 55(2) 2009.

GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A.T.; BARAHONA, F.; WEINTRAUB, A. **Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions: Exploring Exact Approaches**. Operations Research vol.53 p490-500, 2005.

MCDILL, M.; REBAIN, S.; BRAZE, J. **Harvesting scheduling with area based adjacency constraints**. Forest Science 48, 2002.

MCDILL, M. E.; MANNING, P. J. **Optimal parameter settings for solving harvest schedule models with adjacency constraints**. Mathematical and Computational Forestry&Natural-Resource Sciences, Vol. 3, Issue 0, pp. 0–10, 2011.

MCNAUGHTON, A; PAGE, G.; RYAN, D. **Adjacency constraints in forest harvesting**. In: Proceedings of the Orsnz. New Zealand, p. 9-15, 2001.

MURRAY, A. T.; GOYCOOLEA, M.; WEINTRAUB, A. **Incorporating average and maximum area restrictions in harvest scheduling models**. Canadian Journal For. Res. 34: 456–464 (2004).

MURRAY, A. T.; WEINTRAUB, A. **Scale and Unit Specification Influences in Harvest Scheduling with Maximum Area Restrictions.** Forest Science 48 (4), 2002.

VIELMA, J. P.; MURRAY, A. T.; RYAN, D. ; WEINTRAUB, A. **Improving Computational Capabilities for Addressing Volume Constraints in Forest Harvest Scheduling Problems.** European Journal of Forest Research, vol. 176, pages 1246-1264, 2007.

ZHU, J., BETTINGER, P. & Li, R. **Additional insight into the performance of a new heuristic for solving spatially constrained forest planning problems.** Silva Fennica 41(4): 687–698, 2007.

5 PLANEJAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA CONSIDERANDO ÁREAS MÍNIMAS OPERACIONAIS

RESUMO

O planejamento da colheita florestal é essencial para garantir eficiência nas operações envolvidas nesta atividade. Neste sentido, as relações espaciais entre os talhões designados para a colheita em um determinado ano do horizonte de planejamento têm grande importância, uma vez que são determinantes para o planejamento logístico do maquinário e no investimento em estradas. Através da formação de blocos de colheita é possível obter uma redução nos custos relacionados à movimentação das máquinas entre os talhões agendados para o corte raso. Os custos de manutenção e construção de estradas também se tornam menores, uma vez que a produção de vários talhões pode ser transportada por uma mesma estrada. O objetivo deste trabalho foi realizar o planejamento florestal otimizado de uma floresta formada por 236 talhões de *Pinus sp* e *Eucalyptus sp* incluindo restrições para formar blocos de colheita respeitando um limite mínimo de área. Duas abordagens foram utilizadas para a formação dos blocos de colheita. A primeira abordagem, baseada na modelagem de McDill e Rebain (2003) para a formação de áreas de floresta madura. A segunda abordagem utilizada foi a aplicação de restrições denominadas por *ring inequalities*, propostas por Carvajal et al. (2012). Ambas as abordagens foram capazes de gerar blocos de colheita respeitando as áreas mínimas determinadas. O efeito das restrições sobre o valor da função objetivo foram aceitáveis, com uma redução de 5,32% no cenário mais restritivo. Desta forma, a utilização das restrições de área mínima se mostrou uma alternativa viável para o planejamento operacional da colheita florestal.

Palavras chave: restrições de área mínima; planejamento florestal; colheita florestal

ABSTRACT

The forest harvest planning is essential for achieve efficiency in the operations related to this activity. In this sense, the spatial relationships between the stands scheduled for harvesting in a determined year of the planning horizon have great importance, once that they are crucial for the logistics of harvest machinery and investments in the road network. Through clustering harvest activities, it is possible to reduce the costs related to the displacement of the machinery between the harvest fronts. The costs related to construction and maintenance of roads are reduced, given that the production of several stands can be transported in the same road if they are clustered. The objective of this study was to perform the optimized forest planning of a *Pinus sp.* and *Eucalyptus sp.* Forest, composed by 236 stands, including minimum area constraints. Two approaches were applied for clustering harvesting activities. The first approach, based on the formulation proposed by McDill & Rebain (2003) for the formation of old-growth forest areas. The second approach applied was the inclusion of a set of constraints called ring inequalities, proposed by Carvajal et al. (2012). Both formulations were capable to generate harvesting blocks with minimum area requirements. The impact of these constraints on the objective function were acceptable, with a reduction of 5,32% on the objective function in the more restrictive scenario. Thus, the utilization of minimum area constraints showed as a viable alternative for performing the operational planning of forest harvest.

Key words: minimum area constraints; forest planning; forest harvest

5.1 INTRODUÇÃO

A incorporação de aspectos espaciais vem se tornando um componente fundamental no planejamento florestal, principalmente as questões relacionadas ao padrão de paisagem resultante das atividades de colheita (CONSTANTINO et al. 2008). Modelos de otimização foram propostos com o objetivo de incluir estes requisitos espaciais no planejamento florestal, notadamente através da incorporação de restrições de adjacência. O foco da maior parte da literatura estudando estas relações espaciais trata da inclusão destas restrições de adjacência para limitar a área máxima de colheita e desenvolver métodos de solução eficientes para resolver estes problemas (ÖHMAN e LÄMAS, 2003).

Entretanto, a adoção de políticas de restrição da área máxima, inicialmente proposta para beneficiar a vida selvagem, pode resultar em significativos efeitos negativos, causados pela fragmentação das áreas florestais, causadas pela dispersão das áreas de colheita (REBAIN e MCDILL, 2003). Um efeito potencial da dispersão das áreas de colheita é a redução do habitat interior da floresta, e o aumento do perímetro das áreas florestais, causando efeitos de borda (GUSTAFSON, 1996). Além dos efeitos sobre o habitat, a dispersão das áreas de colheita provoca efeitos negativos sobre as operações da colheita florestal. A movimentação das máquinas entre os talhões acarreta na ocorrência de horas improdutivas do maquinário, aumentando o tempo demandado para a operação e consequentemente o custo. Também é dificultada a logística para a construção e manutenção das estradas, pois o maquinário e material envolvidos também necessitam de maior movimentação e tempo.

Na literatura foram propostos modelos com o objetivo de minimizar estes problemas causados pela dispersão das áreas de colheita. Rebain e McDill (2003), que propõe um modelo de programação inteira para manutenção de áreas contíguas de floresta madura, Tóth et al. (2006) formularam um modelo multiobjetivo de programação inteira para a formação de áreas de floresta madura e maximização do VPL, Wei e Hoganson (2007) apresentam 3 modelos de programação inteira

para a modelagem da produção de núcleos de floresta madura através da consideração de zonas de influência. Entre os modelos para a agregação das áreas de colheita podem ser citados Gustafson (1998) que propõe um zoneamento dinâmico para evitar a dispersão dos talhões colhidos. Öhman e Låmas (2003) e Öhman e Eriksson (2010) que apresentam formulações de otimização multiobjetivo para a agregação dos talhões agendados para a colheita e Smaltschinski et al. (2012) que propõe uma análise de cluster para a agregação das atividades da colheita.

O problema da formação de áreas de floresta madura e o problema da agregação das atividades de colheita são problemas relacionados. Ambos visam a conectividade das áreas florestais e se apresentam como difíceis problemas de otimização combinatória. A inclusão de variáveis inteiras e de um número considerável de restrições extras nestes modelos torna a sua resolução difícil em tempos de processamento razoáveis para problemas de grandes dimensões. Neste contexto, uma série de modelos foi proposta para a formação destes blocos de floresta madura. McDill e Rebain (2003) propuseram uma abordagem de programação linear inteira mista baseada na formação de blocos através do algoritmo *Path Algorithm* proposto por McDill (2002). Carvajal et al. (2012) apresenta uma nova abordagem para tratar de problemas de conectividade de florestas maduras a partir de PLI, baseado em problemas de corte em grafos. Com a formulação proposta, os autores conseguiram respostas satisfatórias em tempos razoáveis de resolução.

O objetivo do presente estudo foi introduzir restrições para a agregação das atividades de colheita em um modelo de planejamento florestal otimizado, visando a redução da movimentação das máquinas de colheita entre os talhões selecionados para o corte raso em um mesmo ano do horizonte de planejamento, bem como a redução dos custos de construção e manutenção de estradas. Para tal, duas abordagens foram aplicadas. A primeira foi baseada no modelo de conectividade dinâmica proposto por Carvajal et al. (2012) e a segunda abordagem utilizada foi baseada na formulação de McDill e Rebain (2003). A eficácia das duas

formulações para a formação dos blocos de colheita, bem como seu efeito sobre a função objetivo também foram avaliados.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 Área de estudo

Como área de estudo foi utilizada uma floresta de *Pinus spp* e *Eucalyptus spp*, localizada nos municípios de Bituruna e General Carneiro, Paraná, entre as coordenadas 26°13'58,31" e 26°22'5,634" S e 51°34'14,6 e 51°30'26,14" W. O clima segundo Köppen é classificado como Cfb: sub-tropical úmido mesotérmico, com verões frescos e invernos com ocorrências de geadas severas e frequentes.

A área é composta por 236 talhões, sendo 18 talhões da espécie *Eucalyptus sp*, 21 talhões de *Pinus sp* e 197 talhões de *Pinus taeda*, com uma área total de 2365,8 hectares. A área média dos talhões é de 10,3 ha e o número médio de adjacências por talhão é igual a 3.

5.2.2 Modelos de Otimização

A primeira formulação de restrições para garantir uma área mínima contígua de colheita utilizada foi a abordagem proposta Carvajal et al. (2012) denominada *ring inequalities*. Para a formulação das restrições inicialmente são apresentadas algumas definições.

Considerando um Grafo $G = (V, A)$ definido por um conjunto de vértices V e um conjunto de arestas A , onde a cada vértice é atribuído um peso w . Também considerando um requisito mínimo W para a soma dos pesos referentes aos vértices.

Para cada vértice presente em G , é definido o seguinte conjunto:

$$C(v, W) = \{C \subseteq V : v \in C, \sum_{u \in C} w_u \leq W\} \quad (5.1)$$

(CARVAJAL, et al., 2012)

Onde $C(v, W)$ representa o conjunto de vértices incluindo o vértice v , cuja soma dos pesos dos vértice é inferior ao critério adotado W .

Considerando ainda para cada conjunto C , um conjunto de vizinhança como segue:

$$\partial C = \{u \in V \setminus C : \exists v \in C, \{u, v\} \in A\} \quad (5.2)$$

(CARVAJAL, et al., 2012)

O conjunto ∂C contém todos os vértices não contidos em C , que são adjacentes aos vértices que compõem C .

Assim com base nas definições anteriores, substituímos os vértices em G por variáveis binárias representando os talhões de uma área florestal e os pesos w , pelas áreas correspondentes a estes talhões. Também definindo $C(A_{min})$ como o conjunto de blocos de talhões, cuja soma da área de seus elementos é inferior ao limite mínimo estabelecido A_{min} , é possível introduzir o seguinte conjunto de restrições:

$$\sum_{u \in \partial C} x_{uj} \geq \sum_{i \in C} x_{ij} - n_c \quad \forall C \in C(A_{min}), \forall j \quad (5.3)$$

Onde:

x_{ij}, x_{uj} : variáveis binárias que assumem valor 1 caso o talhão i ou u seja colhido no ano j ou valor 0 caso contrário.

- n_c : número de talhões presentes no conjunto C menos um
- C : conjunto de talhões que viola o requisito mínimo de área
- $C(A_{min})$: todos os conjuntos de talhões inferiores à área mínima estabelecida

A partir da restrição (5.3) é estabelecido que caso um grupo de talhões seja selecionado para o corte raso em um determinado ano do horizonte de planejamento, onde a soma de suas áreas correspondentes é inferior à área mínima estabelecida, pelo menos um talhão adjacente ao conjunto considerado e ainda não presente neste conjunto também seja selecionado para a colheita no mesmo ano. Esta restrição é imposta para todos os conjuntos de talhões que violam a área mínima. Desta forma é possível garantir que, em um mesmo ano do horizonte de planejamento, que não sejam selecionados para a colheita talhões ou grupos de talhões isolados, cuja área seja inferior ao limite estabelecido.

Para a implementação destas restrições foi utilizado um algoritmo baseado no algoritmo *Path*, inicialmente proposto por McDill et al. (2002) para a formulação de restrições de área máxima do tipo ARM (*Area Restriction Model*).

Para a formação das restrições de área mínima é necessária uma alteração no algoritmo. Primeiramente é necessário inverter o critério de parada do algoritmo. Inicia-se com um talhão e são formados recursivamente os blocos de talhões até que se obtenha a área mínima. Caso a área mínima seja alcançada, inicia-se a formação de um novo bloco. Também é necessária a inclusão de uma sub-rotina a cada chamada recursiva no algoritmo. Tendo em vista que a cada chamada a área mínima ainda não foi atingida, constata-se que o grupo atual considerando no algoritmo faz parte de $C(A_{min})$, portanto é necessária a inclusão de uma subrotina que identifique todos os talhões adjacentes a este bloco e escreva a restrição correspondente. O pseudocódigo do algoritmo é descrito na QUADRO 5.1 a seguir:

- 1 Inicie com o primeiro talhão
- 2 Calcule o somatório da área
- 3 Caso a área seja inferior ao limite estabelecido identifique todos os talhões adjacentes ao grupo considerado e escreva a restrição
Caso contrário inicie o próximo bloco
- 4 Adicione recursivamente um talhão adjacente ao bloco considerado e volte ao passo 2
- 5 Caso todos os talhões tenham passado pelo passo 1 pare
Caso contrário volte ao passo 1, iniciando com o próximo talhão

QUADRO 5.1 - PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO PARA FORMAÇÃO DE RESTRIÇÕES DE ÁREA MÍNIMA

Desta forma, considerando uma área florestal hipotética (FIGURA 5.1) e um limite de área mínimo igual a 30 ha, é possível exemplificar as restrições de área mínima como segue:

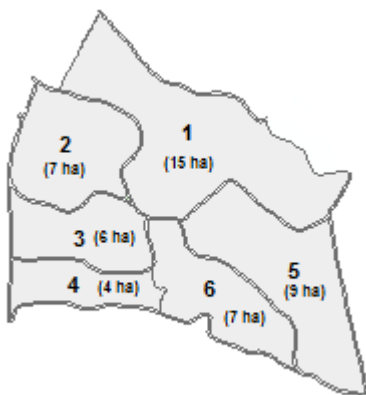


FIGURA 5.1 – ÁREA DE ESTUDO HIPOTÉTICA

$$x_{2j} + x_{3j} + x_{6j} + x_{5j} \geq x_{1j}$$

$$x_{1j} + x_{3j} \geq x_{2j}$$

$$x_{2j} + x_{1j} + x_{6j} + x_{4j} \geq x_{3j}$$

$$\vdots$$

$$x_{3j} + x_{5j} + x_{6j} \geq x_{1j} + x_{2j} - 1$$

$$x_{2j} + x_{4j} + x_{5j} + x_{6j} \geq x_{1j} + x_{3j} - 1$$

$$\vdots$$

$$x_{1j} + x_{3j} \geq x_{4j} + x_{5j} + x_{6j} - 2$$

$$\vdots$$

$$x_{1j} + x_{5j} \geq x_{2j} + x_{3j} + x_{4j} + x_{6j} - 3$$

$$\vdots$$

Tendo em vista o exposto, se introduz a seguinte formulação para a resolução do problema de agendamento da colheita florestal considerando áreas mínimas operacionais:

Maximizar

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} c_{ij} x_{ij} \tag{5.4}$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^{HP} x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (5.5)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq 0.9 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (5.6)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq 1.1 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (5.7)$$

$$\sum_{u \in \partial C} x_{uj} \geq \sum_{i \in C} x_{ij} - n_c \quad \forall C \in \mathcal{C}(A_{min}), j = 1 \dots 5 \quad (5.8)$$

$$x_{ij}, x_{uj} \in \{0, 1\} \quad \forall i, \forall j, \forall u \quad (5.9)$$

Onde:

N : Número de talhões da floresta

HP : Número de anos do horizonte de planejamento

c_{ij} : VPL gerado pelo talhão i seja colhido no ano j

x_{ij} : variável binária de decisão que assume valor 1 caso o talhão i seja colhido no ano j ou valor 0 caso contrário

v_{ij} : volume gerado pelo talhão i no ano j

A_{min} : área mínima

C : conjunto de talhões que viola o requisito mínimo de área

$\mathcal{C}(A_{min})$: todos os conjuntos de talhões inferiores à área mínima estabelecida

A função (5.4) representa a função objetivo do modelo de planejamento, maximizando o VPL total da floresta, a partir do somatório do VPL gerado por cada talhão sujeito a um determinado regime de manejo.

A equação (5.5) impõe que a cada talhão seja colhido apenas uma vez ao longo do horizonte de planejamento. As restrições (5.6) e (5.7) são as restrições de equilíbrio da produção, impedindo que o volume de madeira colhido a cada ano do horizonte de planejamento esteja dentro dos limites estabelecidos. No problema em questão, a variação permitida para o volume a cada ano do horizonte de planejamento foi de 10% em relação ao volume colhido no primeiro ano do HP.

A restrição (5.8) representa o conjunto de restrições de área mínima, garantindo que as áreas agendadas para colheita sejam maiores ou iguais ao limite mínimo estabelecido. Foram testados diferentes limites de área mínima de colheita. Foram criados cenários com restrições de área mínima para os limites de 30, 40, 50 e 60 ha. A restrição (5.9) impõe que as variáveis de decisão x_{ij} assumam apenas valores binários.

A segunda abordagem utilizada tem por base a formação de blocos de colheita *a priori*, garantindo que os todos os talhões selecionados para a colheita em um ano do HP façam parte de pelo menos um destes blocos de colheita. Como a formação dos blocos de colheita se dá *a priori*, se faz necessária a determinação de limites de mínimos e máximos para a área de cada bloco. A partir desta informação, todos os blocos possíveis entre estes limites superior e inferior são gerados e posteriormente incluídos ao modelo de otimização. Para a formação dos blocos, uma rotina baseada no algoritmo *Path* foi implementada. O pseudocódigo do algoritmo é demonstrado na QUADRO 5.2, a seguir:

- 1 Inicie o primeiro talhão
- 2 Calcule o somatório da área
- 3 Caso a área seja inferior ao limite mínimo estabelecido vá ao passo 4
- Caso a área seja superior ao limite mínimo e inferior ao limite máximo escreva a restrição
- Caso a área seja superior ao limite máximo passe ao próximo bloco
- 4 Adicione recursivamente um talhão adjacente ao bloco considerado e volte ao passo 2
- 5 Caso todos os talhões tenham passados pelo passo 1 pare

QUADRO 5.2 - PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO PARA FORMAÇÃO DE BLOCOS DE COLHEITA

Para a formação das restrições de formação de blocos de colheita se introduz a seguinte variável binária:

$$B_{kj} \begin{cases} 1 & \text{caso o bloco } k \text{ seja colhido no ano } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Considerando S como o conjunto de todos os blocos de talhões formados a partir do algoritmo demonstrado no QUADRO 5.2 e C_k como o conjunto de talhões incluídos no bloco k , se introduz o seguinte conjunto de restrições:

$$\sum_{i \in C_k} x_{ij} \geq n_k B_{kj} \quad \forall j, \forall k \in S \quad (5.10)$$

Onde:

x_{ij} - variável binária que assume valor 1 caso o talhão i seja selecionado para a colheita no ano j

n_k - número de talhões presente no bloco k

B_{kj} - variável binária que assume valor 1 caso o bloco k seja selecionado para a solução no ano j

C_k - conjunto de talhões presente no bloco k

S - conjunto com todos os blocos de talhões formados entre os limites mínimos e máximos de área

A partir da restrição (5.10) se garante que caso o bloco de colheita k seja selecionado para a colheita em um determinado ano do horizonte de planejamento, todos os talhões pertencentes a este bloco sejam selecionados para a colheita no mesmo ano do HP.

Considerando ainda P_i como o conjunto de blocos de colheita nos quais o talhão i está incluso, se faz necessária a introdução do seguinte conjunto de restrições:

$$\sum_{k \in P_i} B_{kj} \geq x_{ij} \quad \forall i, \forall j \quad (5.11)$$

Onde:

x_{ij} - variável binária que assume valor 1 caso o talhão i seja selecionado para a colheita no ano j

B_{kj} - variável binária que assume valor 1 caso o bloco k seja selecionado para a solução no ano j

P_i - conjunto de blocos de colheita nos quais o talhão i está incluso

A restrição (5.11) visa garantir que caso um talhão i seja selecionado para a colheita em um determinado ano do HP, um bloco de colheita do qual i faz parte também seja escolhido para a colheita.

Desta forma, para a área hipotética da FIGURA 5.1, considerando uma amplitude de 10 ha e limite mínimo de área igual a 30 ha temos:

$$x_{1j} + x_{2j} + x_{3j} + x_{4j} \geq 4 \cdot B_{1j}$$

$$x_{1j} + x_{2j} + x_{3j} + x_{6j} \geq 4 \cdot B_{2j}$$

$$x_{1j} + x_{3j} + x_{4j} + x_{6j} \geq 4 \cdot B_{3j}$$

$$\vdots$$

$$B_{1j} + B_{2j} + B_{3j} + \dots + B_{nj} \geq x_{1j}$$

$$\vdots$$

Tendo em vista o exposto anteriormente, tem-se o modelo de otimização como segue:

Maximizar

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} c_{ij} x_{ij} \quad (5.12)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^{HP} x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (5.13)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq 0.9 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (5.14)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq 1.1 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (5.15)$$

$$\sum_{i \in c_k} x_{ij} \geq n_k B_{kj} \quad \forall k \in S, j = 1 \dots 5 \quad (5.16)$$

$$\sum_{k \in P_i} B_{kj} \geq x_{ij} \quad \forall i, j = 1 \dots 5 \quad (5.17)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j \quad (5.18)$$

Onde:

N : Número de talhões da floresta

HP : Número de anos do horizonte de planejamento

c_{ij} : VPL gerado pelo talhão i seja colhido no ano j

x_{ij} : variável binária de decisão que assume valor 1 caso o talhão i seja colhido no ano j ou valor 0 caso contrário

v_{ij} : volume gerado pelo talhão i no ano j

n_k : número de talhões presente no bloco k

B_{kj} : variável binária que toma valor 1 caso o bloco k seja selecionado para a solução no ano j

C_k : conjunto de talhões presente no bloco k

S : conjunto com todos os blocos de talhões formados entre os limites mínimos e máximos de área

P_i : conjunto de blocos de colheita nos quais o talhão i está incluso

As equações (5.12) – (5.15) e (5.18) são as mesmas restrições (4.3) – (4.6) e (4.9), expostas anteriormente. As restrições (5.16) e (5.17) representam as restrições para a obtenção de blocos de área mínima de colheita. Os mesmos limites mínimos de área utilizados na formulação baseada no modelo de Carvajal et al. (2012) foram utilizados. A restrição (5.16) impõe a condição de que caso um bloco seja selecionado para a colheita, todos os talhões presentes neste bloco sejam colhidos no mesmo ano do HP. A restrição (5.17) impõe que todos os talhões colhidos em um ano do HP façam parte de pelo menos um bloco de colheita.

O horizonte de planejamento adotado foi de 16 anos, em regimes de manejo sem desbaste. As restrições de equilíbrio da produção utilizadas permitiam uma variação de 10% para mais ou para menos com relação ao volume colhido no primeiro ano do HP. Para a formação dos blocos de colheita para o modelo baseado nas restrições de McDill e Rebain, foram utilizadas amplitudes de 10 e 20 ha para a área dos blocos. Desta forma foram obtidos 14 cenários (TABELA 5.1).

TABELA 5.1 – CENÁRIOS TESTADOS

Cenário	Nome	Restrições
1	Livre	5.5, 5.9
2	Livre e equilíbrio	5.5, 5.6, 5.7, 5.9
3	Ring 30 ha e equilíbrio	5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9
4	Ring 40 ha e equilíbrio	5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9
5	Ring 50 ha e equilíbrio	5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9
6	Ring 60 ha e equilíbrio	5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9
7	McDill 30 – 40 ha e equilíbrio	5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18

Cenário	Nome	Restrições
8	McDill 40 – 50 ha e equilíbrio	5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18
9	McDill 50 – 60 ha e equilíbrio	5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18
10	McDill 60 – 70 ha e equilíbrio	5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18
11	McDill 30 – 50 ha e equilíbrio	5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18
12	McDill 40 – 60 ha e equilíbrio	5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18
13	McDill 50 – 70 ha e equilíbrio	5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18
14	McDill 60 – 80 ha e equilíbrio	5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cenários de planejamento foram gerados por meio do software Optimber-LP e em seguida os modelos de otimização foram resolvidos através do software Gurobi 5.5 em computador com processador Intel® Core™ Duo CPU 2,93 GHz e 4Mb de memória RAM. Os resultados obtidos após 1,5 hora de otimização são demonstrados a seguir:

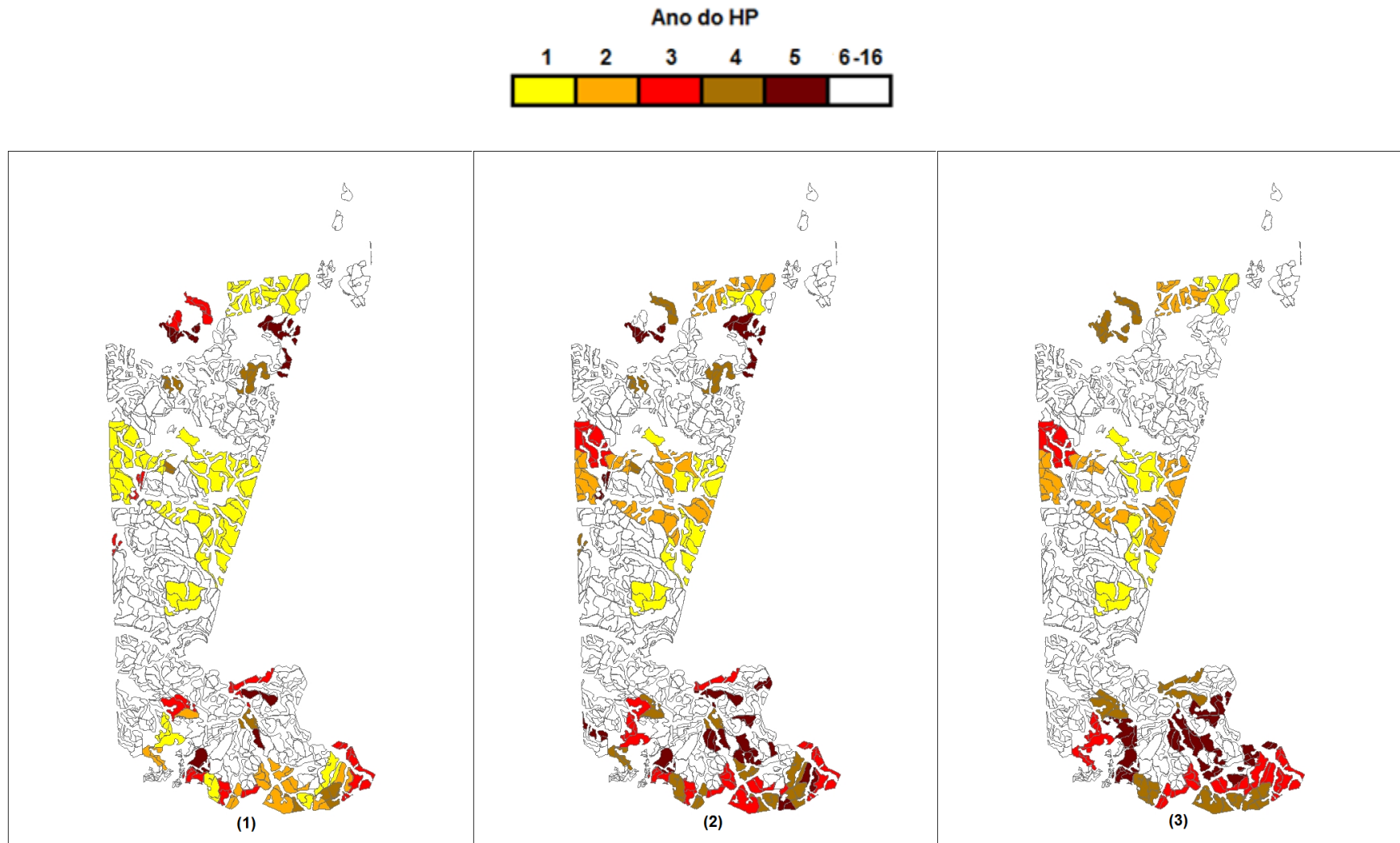


FIGURA 5.2 – CONTINUA...

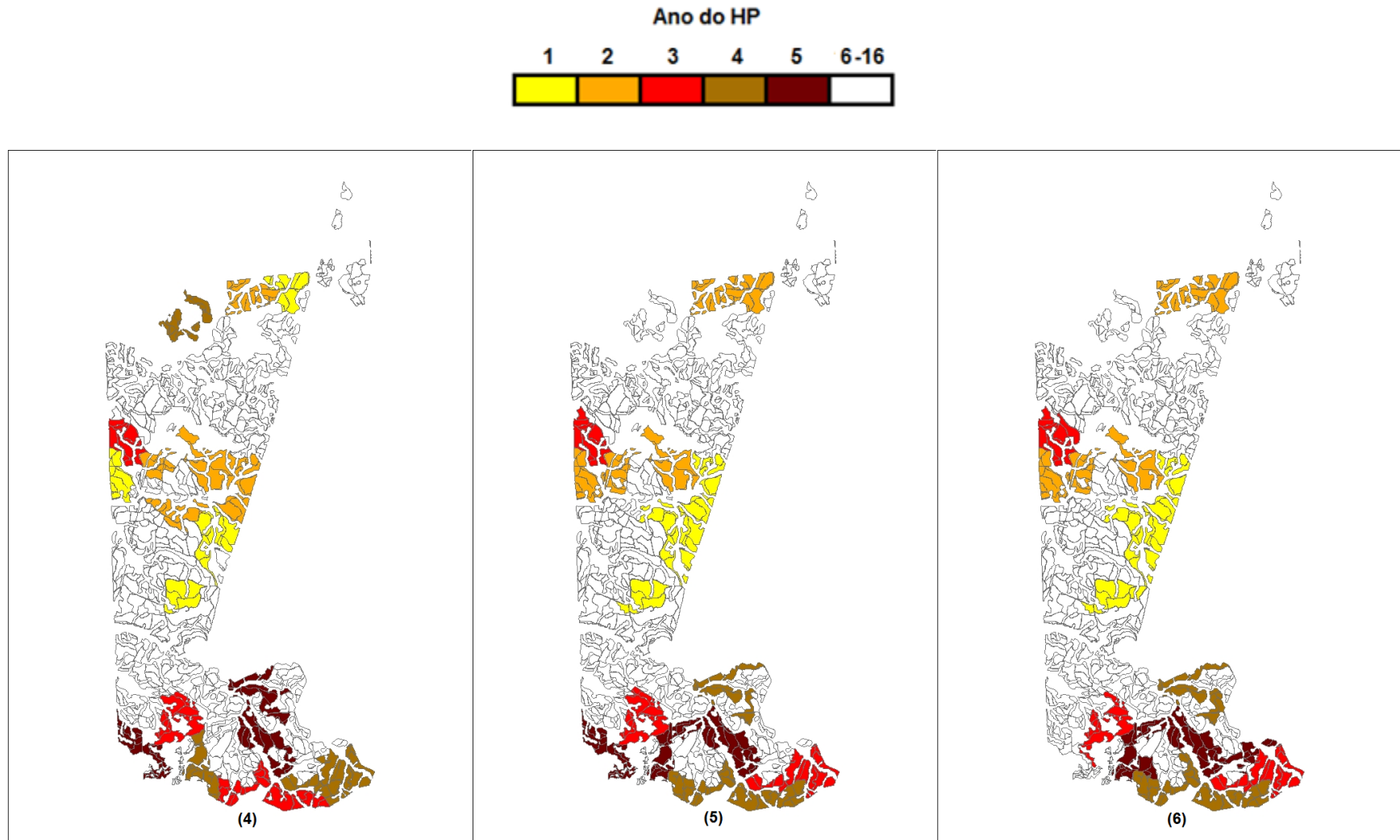


FIGURA 5.2 – AGENDAMENTO DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS LIVRE E RING INEQUALITIES

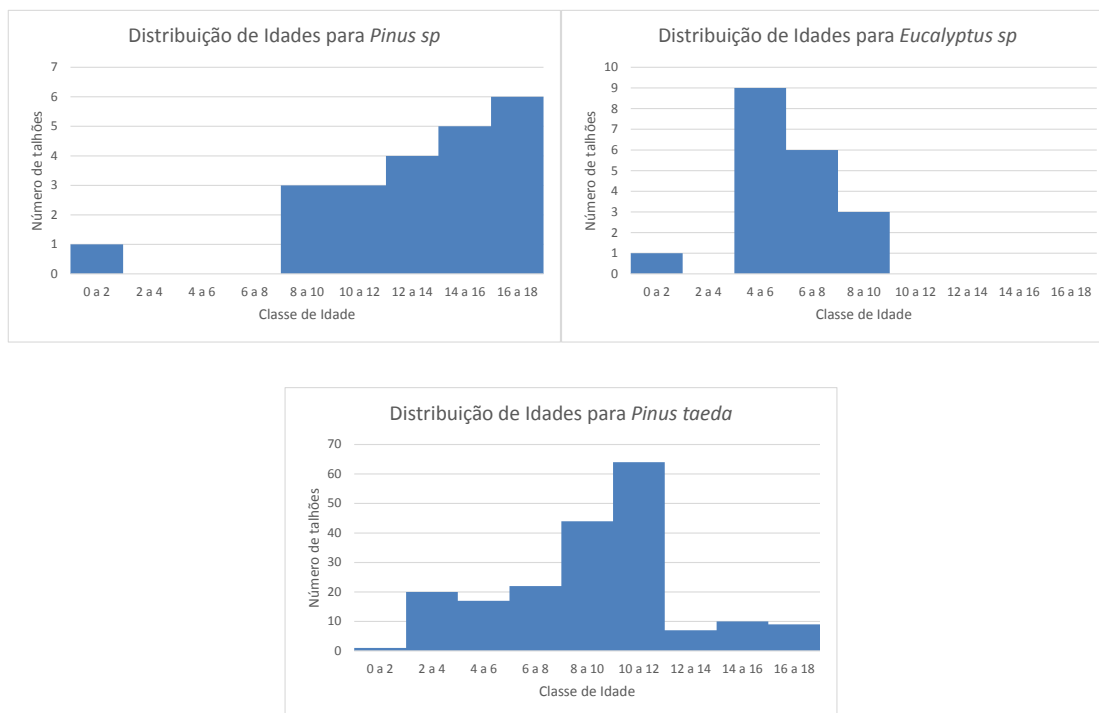


FIGURA 5.3 - DISTRIBUIÇÃO DE IDADES POR ESPÉCIE

É possível observar na FIGURA 5.2 os resultados do agendamento da colheita. Para o cenário livre (1) em que não foi aplicada a restrição de equilíbrio, a maior parte dos talhões foi selecionada para o corte raso no primeiro ano do horizonte de planejamento. Devido à distribuição de idades dos talhões de *Pinus sp*, com a maior parte dos talhões com idade de 16 a 18 anos e *Eucalyptus sp*, com grande número de talhões com mais de 6 anos de idade (FIGURA 5.3). A taxa de crescimento destes talhões está se tornando inferior à taxa de juros aplicada ao cálculo do VPL. Com isso, estes talhões são designados para a colheita imediata. Com a inclusão da restrição de equilíbrio no cenário 2, uma maior distribuição de talhões colhidos ao longo do HP foi observada, comparado ao cenário 1.

Nos cenários 1 e 2, sem inclusão de restrições de área mínima se observa a ocorrência de fragmentação de áreas de colheita, principalmente no ano 5 do HP. Nos demais anos há ocorrência de talhões isolados, porém também há organização de talhões em blocos. Com a introdução de restrições de área mínima nos cenários

3 a 6, há um rearranjo do agendamento da colheita, principalmente no ano 5, formando blocos de colheita na região sul da área de estudo.

Nos cenários 3 a 6, com o progressivo aumento no limite de área de 30 para 60 ha, houve alteração na configuração e localização dos blocos de colheita em cada cenário para a formação dos blocos respeitando a área mínima. Em todos os cenários o limite foi respeitado, e as maiores alterações ocorreram no ano 5 do HP. Os talhões agendados para o primeiro e segundo ano também sofreram alterações na configuração dos blocos, porém a localização dos talhões agendados para a colheita em sua maior parte permaneceu constante.

Comparando-se os cenários 3 e 4, com o aumento do limite de área mínima de 30 para 40 ha, houve alterações nos talhões agendados para o ano 2 e 3 do HP. Blocos com menos de 40 ha foram observados nos anos 2 e 3 do HP para o cenário 3. O bloco presente no ano 2 deixou de ser colhido e o bloco designado para a colheita no ano 3 foi transferido para o ano 4 no cenário 4, onde passou a fazer parte de um bloco de maior área. Com o aumento do limite de área para 50 ha, um dos blocos designados para o ano 3 deixou de ser colhido, e talhões designados para colheita no ano 3, presentes no cenário 4, foi transferido para o ano 2, formando um bloco com área superior a 50 ha. O aumento do limite de área de 50 para 60 ha gerou alteração no agendamento da colheita dos talhões, porém os blocos permaneceram essencialmente inalterados.

Considerando que o objetivo da inclusão de restrições de área mínima ao modelo de otimização é agregar as áreas de colheita, e desta forma reduzir a movimentação do maquinário entre as áreas de colheita, a ocorrência de blocos muito isolados em um mesmo ano do horizonte de planejamento, como se observa nos cenários 3 e 4, podem gerar resultados insatisfatórios, como a ocorrência de blocos localizados nos extremos da área no ano 4 do HP.

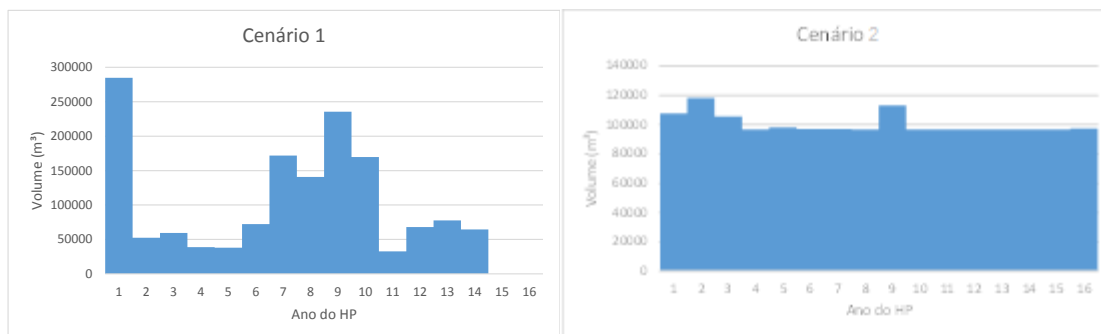


FIGURA 5.4 – VOLUME ANUAL DE COLHEITA PARA OS CENÁRIOS SEM RESTRIÇÕES DE ÁREA MÍNIMA

Com base nos resultados obtidos na FIGURA 5.4, é possível observar as alterações nos volumes de colheita a cada ano do HP. No cenário 1 ocorrem picos de produção no ano 1 e 9 do HP. O pico de produção no ano 1 é causado pela colheita de talhões antigos de *Pinus sp.* e talhões de *Eucalyptus sp.* em idade de corte. O pico de produção do ano 9 pode ser explicado pela distribuição de idades de *Pinus taeda* na área (FIGURA 5.3), com grande parte dos talhões com idades de 8 a 12 anos, portanto atingindo idade de corte próximo ao nono ano do HP.

No cenário 2 é possível observar que há a tendência de colheita de um maior volume nos anos iniciais do HP e também um pico no ano 9, pelos mesmos motivos citados anteriormente. Entretanto, com a inclusão das restrições de equilíbrio a variação do volume obtido a cada ano é suavizada, obedecendo a variação máxima estabelecida de 10% com relação ao primeiro ano do HP.

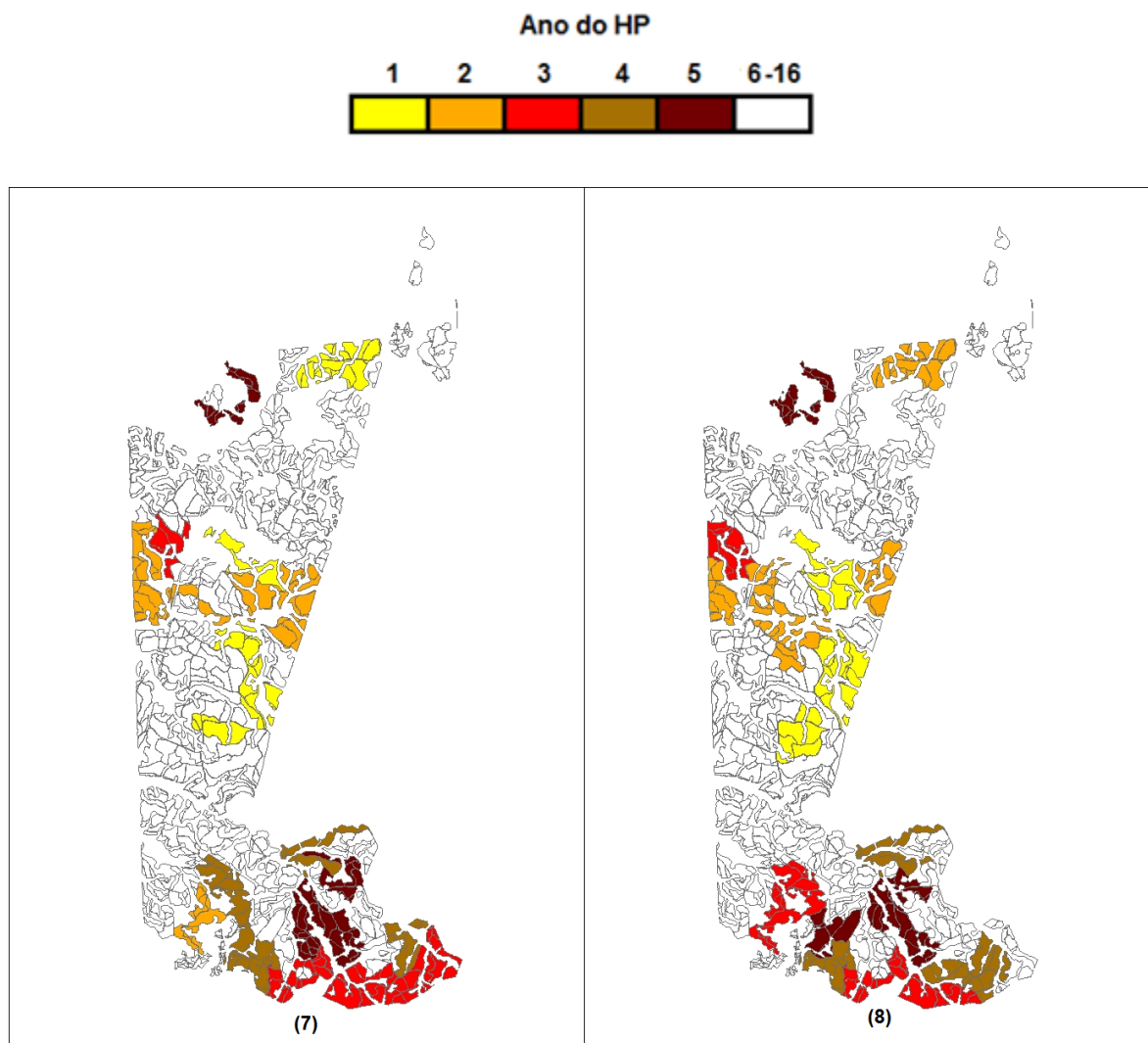


FIGURA 5.5 – CONTINUA...

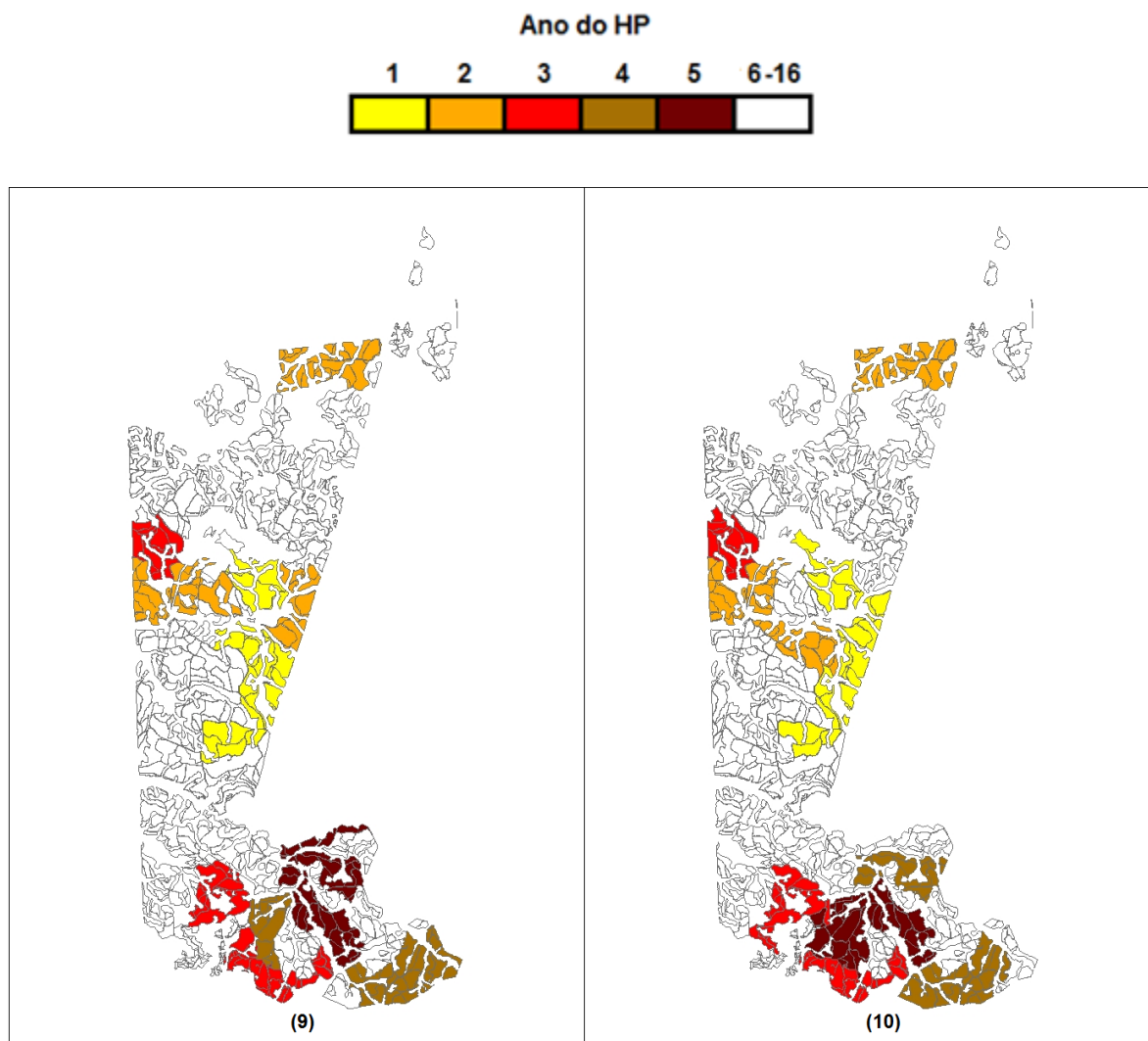


FIGURA 5.5 – AGENDAMENTO DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS DE RESTRIÇÕES DE BLOCOS COM 10 HA DE AMPLITUDE

Considerando a FIGURA 5.5 é possível observar a formação de blocos de colheita através da formulação com amplitude de 10 hectares. Para todos os cenários, os resultados obtidos para os primeiros 2 anos do HP foram semelhantes, com sensíveis variações nos blocos formados. Com o aumento do limite de área de 30 para 40 hectares, houve uma transferência de colheita de talhões do ano 2 para o ano 3 em virtude da ocorrência de blocos com área menor de 40 hectares no cenário 7. O mesmo comportamento foi observado no ano 4 e 5 nos mesmos

cenários, com o adiamento da colheita de talhões para a formação dos blocos de colheita com maior área.

Considerando os cenários 9 e 10, as maiores alterações foram observadas no ano 5, ocorrendo além do adiamento e antecipação da colheita entre blocos semelhantes, houve a formação de novos blocos no cenário 10, principalmente no ano 10.

De maneira geral, todos os modelos atingiram o objetivo de formação de blocos de colheita. Entretanto, nos cenários 7 e 8, a ocorrência de um pequeno bloco de talhões no extremo norte da área não é desejável do ponto de vista logístico. O mesmo comportamento é observado no ano 5 para todos os cenários considerados, com ocorrência de 2 blocos distantes entre si.

Comparando-se os resultados obtidos nos cenários 7 a 10 com os resultados dos cenários 3 a 6, mais uma vez houve a formação de blocos semelhantes nos primeiros 2 anos do HP, em virtude destes blocos se aproximarem dos resultados obtidos no cenário livre, indicando que a configuração espacial no período ideal de colheita se apresenta de forma agregada. As maiores variações foram observadas no ano 5 do HP, principalmente com relação ao ano de colheita, uma vez que os blocos formados foram semelhantes.

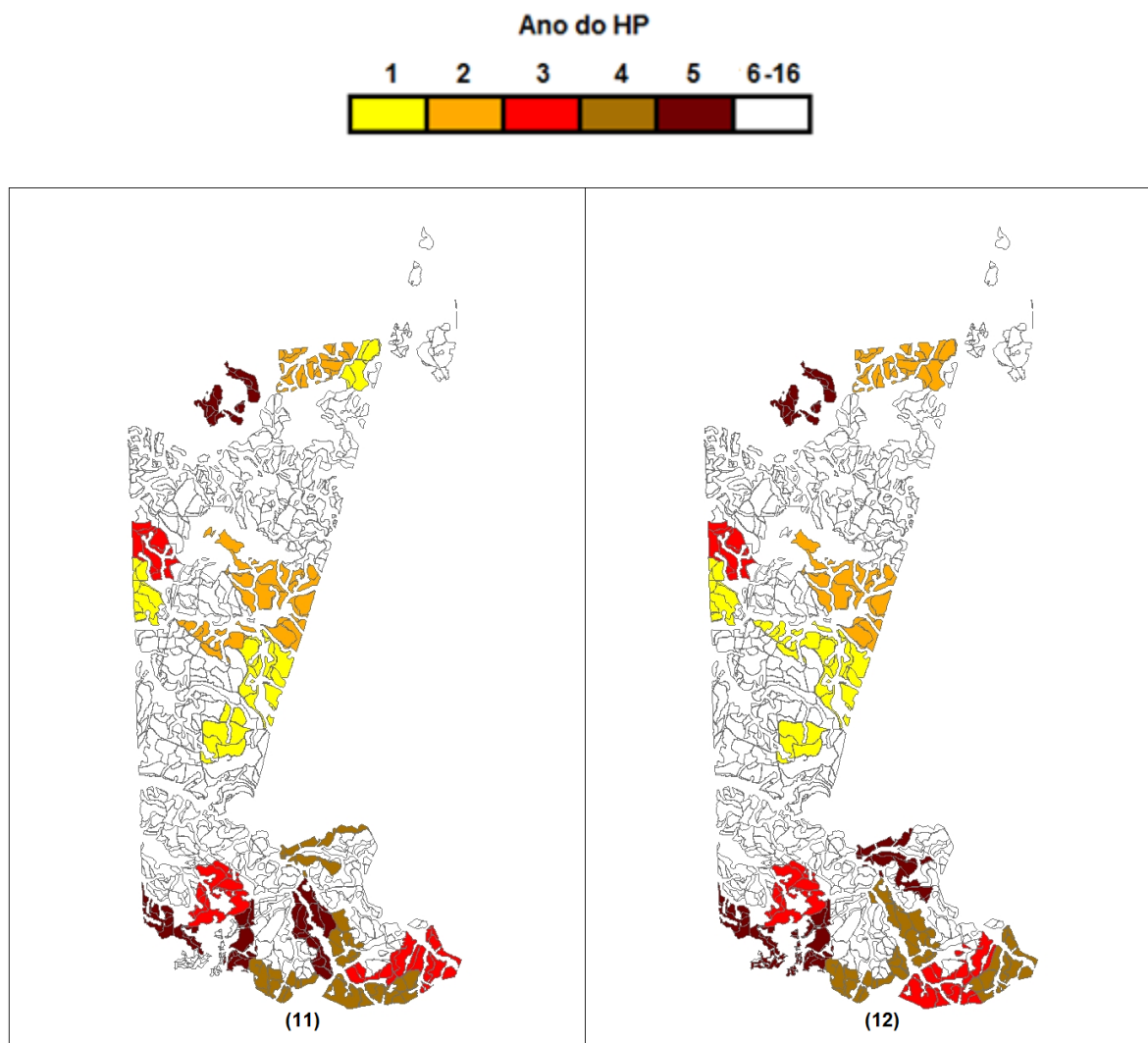


FIGURA 5.6 – CONTINUA...

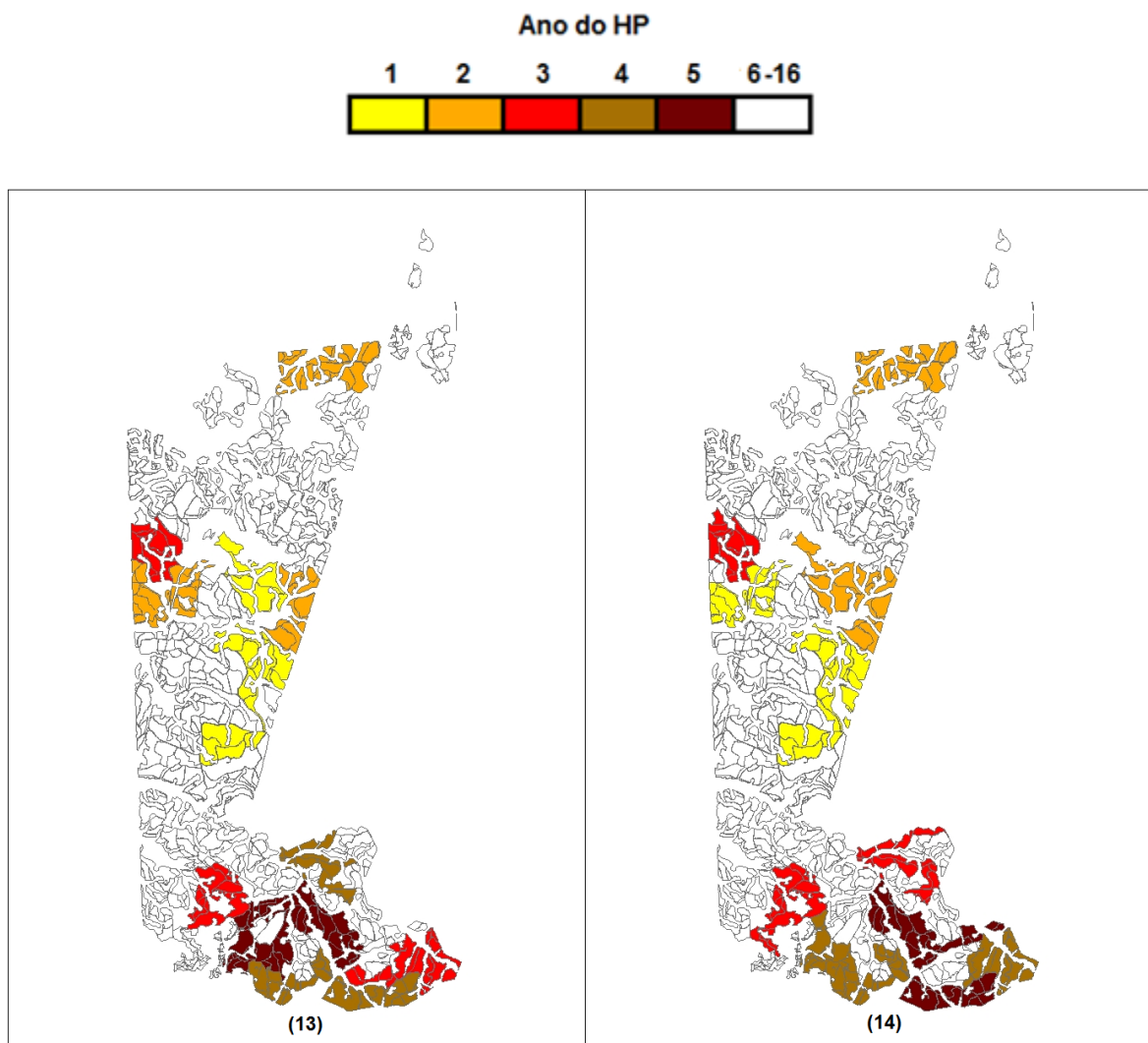


FIGURA 5.6 – AGENDAMENTO DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS DE RESTRIÇÕES DE BLOCOS COM 20 HA DE AMPLITUDE

Na FIGURA 5.6 é possível observar os resultados obtidos através da formulação de blocos de colheita com amplitude de 20 hectares. Se observa que os blocos formados para todos os limites de área aplicados foram semelhantes, apenas com a alteração nos anos de colheita dos talhões, permitindo a formação de blocos de forma a respeitar os limites estabelecidos em cada caso.

Comparando-se os resultados com os obtidos nos cenários anteriores, se observa que houve semelhança nos blocos formados nos primeiros 2 anos novamente e maiores alterações nos blocos formados nos demais anos do HP. As

principais diferenças foram observadas para os cenários com limite de área igual a 60 hectares. Como neste caso há um grande número de blocos possíveis, que levam a uma resposta semelhante, se observa uma maior variação nas respostas, devido a particularidades no processo de resolução de cada problema. Nos cenários com limites menores, os blocos formados foram semelhantes, com alterações nos anos de colheita dos talhões.

Com base no exposto acima, se observa que no que se refere à formação de blocos, todos os modelos obtiveram resultados satisfatórios, sendo capazes formar blocos respeitando os limites de área estabelecidos. Não houve grandes diferenças entre as formulações no que se refere ao cumprimento do requisito de área mínima. Desta forma, com objetivo de avaliar a performance das formulações, critérios adicionais foram analisados e os resultados são demonstrados na FIGURA 5.7:

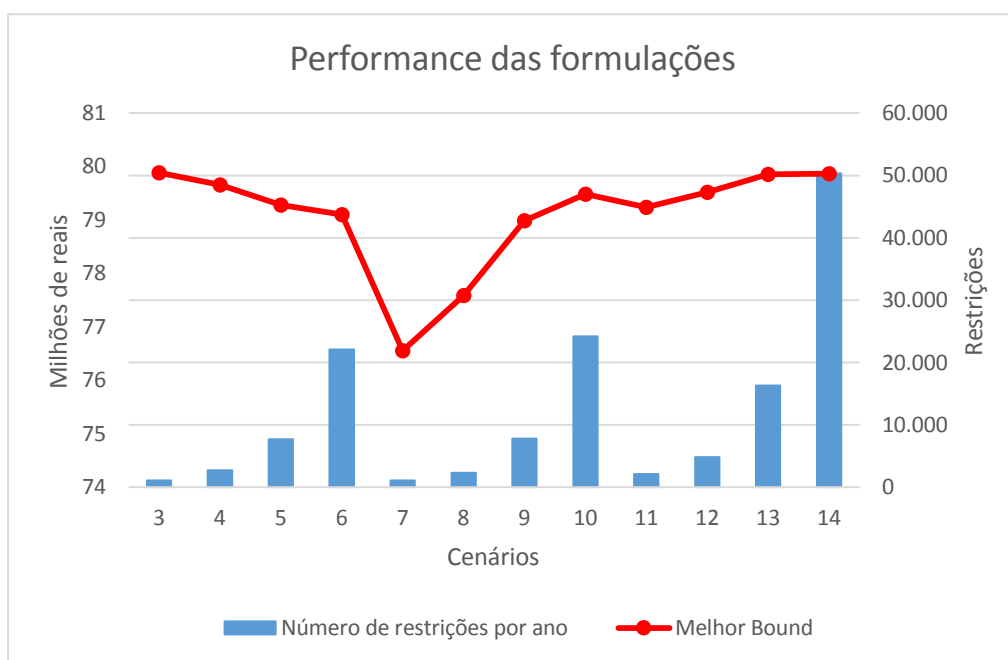


FIGURA 5.7 – PERFORMANCE DAS FORMULAÇÕES EM NÚMERO DE RESTRIÇÕES E MELHOR *BOUND*

Com base nos resultados obtidos na FIGURA 5.7 é possível observar o efeito do aumento do limite de área mínima sobre o modelo de otimização. Com o

aumento do limite mínimo de área, há criação de restrições adicionais em taxa exponencial, devido ao crescimento do número possível de combinações para formar blocos que respeitam os limites de área, acarretando em uma maior complexidade para a resolução do modelo de otimização. As formulações com base no modelo de McDill e Rebain (2003) com amplitude de 10 hectares e a formulação baseada no modelo de Carvajal et al. (2012) apresentaram número de restrições semelhante para todos os limites de área, com o modelo de McDill e Rebain (2003) apresentando número de restrições sensivelmente inferiores para limites de 30 e 40ha. Para todos os limites de área testados, nos cenários 11 a 14, com amplitude de 20 hectares apresentaram o maior número de restrições. Para a resolução de problemas de otimização, é preferível a utilização de modelos mais compactos, pois o processo de resolução do problema se torna mais eficiente, obtendo resultados satisfatórios em um intervalo de tempo menor. Neste sentido, os modelos de Carvajal et al. (2012) e os modelos com amplitude de 10 hectares obtiveram melhor performance.

Entretanto, quando se considerando os modelos baseados na formulação de McDill e Rebain (2003), se faz necessária uma análise do melhor *bound* obtido. O melhor *bound* representa o valor procurado para a função objetivo durante o processo de otimização. Desta forma, *bounds* maiores representam a possibilidade de obtenção de respostas mais satisfatórias.

É possível constatar que os *bounds* dos cenários com amplitude de 10 hectares foram inferiores aos *bounds* obtidos nos cenários com amplitude de 20 hectares. Com amplitudes menores, o processo de formação dos blocos pode ser tendencioso, não incluindo todas as combinações possíveis de blocos que respeitam os limites da área mínima estabelecida. Adicionalmente, podem ocorrer casos em que talhões não sejam incluídos em nenhum bloco. Desta forma a gama de opções de soluções é reduzida, gerando uma limitação no modelo que é refletida no *bound* de cada cenário. Neste sentido, apesar de a formulação com amplitude de 10 hectares apresentar um menor número de restrições, as possibilidades de

solução são reduzidas e a resposta obtida tende a ser inferior a formulação com maior amplitude.

A formulação com base no modelo de Carvajal et. Al (2012) obteve os resultados mais satisfatórios, com número reduzido restrições e com os melhores valores para os *bounds*. Estes efeitos também podem ser observados nas respostas da otimização, como demonstrado na TABELA 5.2:

TABELA 5.2 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

CENÁRIO	VOLUME (M³)	VPL (R\$)	VARIAÇÃO (%)	NÚMERO DE RESTRIÇÕES
1	1.506.906,6	82.378.134,05	-	82.712
2	1.609.073,3	80.198.885,85	-2,64	82.742
3	1.607.172,4	79.876.998,44	-3,04	88.212
4	1.601.475,4	79.469.675,57	-3,53	95.172
5	1.597.700,7	79.288.086,67	-3,75	121.382
6	1.589.151,9	79.008.199,90	-4,09	193.357
7	1.547.129,6	76.510.339,35	-7,12	88.187
8	1.561.452,5	77.473.046,50	-5,95	94.952
9	1.577.441,1	78.243.785,68	-5,02	121.767
10	1.574.370,8	78.054.348,54	-5,25	203.867
11	1.598.461,7	79.130.181,60	-3,94	93.452
12	1.602.819,9	79.377.713,39	-3,64	106.967
13	1.589.450,7	78.868.817,10	-4,26	164.417
14	1.588.114,4	78.403.869,17	-4,82	334.527

Com base nos resultados obtidos na TABELA 5.2, se observa que a inclusão das restrições de equilíbrio tem impacto significativo no VPL gerado pela floresta, com um decréscimo de 2,65% para o cenário sem inclusão de restrições de área mínima. O maior impacto no VPL obtido foi observado no cenário 7, com redução de 7,12%. De maneira geral os efeitos das restrições de área mínima tiveram impactos aceitáveis sobre o VPL. É possível observar que os resultados mais satisfatórios nos cenários com inclusão das restrições de área mínima baseadas no modelo de Carvajal et al. (2012), com reduções de 3,04 a 4,09%. As restrições de blocos de colheita com amplitude de 20 ha apresentaram reduções de 3,94 a 4,82% ao VPL e os cenários com amplitude de 10 ha obtiveram os piores resultados. Esse comportamento reflete a limitação no conjunto de soluções possíveis imposta pela formulação com formulação de blocos *a priori*, em casos em que nem todos os talhões sejam incluídos em blocos durante a formulação das restrições. Nestes casos, os talhões que não estão incluídos em nenhum bloco não devem fazer parte da solução nos anos em que a restrição de área mínima é aplicada, impactando a resposta obtida.

Pelo mesmo motivo se observa que o resultado obtido nos cenários 6 e 7, com limites mínimos de área de 30 e 40 ha, respectivamente, foram inferiores ao resultado do cenário 9, com limite de 60 ha. É esperado que com o aumento do limite mínimo de área, ocorra uma redução na FO, pois o modelo se torna mais restritivo. Entretanto, neste caso o fato da proibição da colheita de vários talhões nos primeiros 5 anos do HP, por não estarem presentes em nenhum bloco, causou uma redução mais significativa ao VPL quando comparada ao cenário com limite mínimo superior, em que o número de casos em que os talhões não foram incluídos em nenhum bloco foi menor. O mesmo comportamento é observado no cenário 11, com resultado inferior ao cenário 12.

Entretanto nos demais casos, o aumento do limite de área causou redução no valor da função objetivo. Considerando que os talhões na floresta não estão uniformemente distribuídos quanto ao seu estoque, a ocorrência de talhões adjacentes com diferentes áreas e estoques se torna problemática quando é

necessária a manutenção do fluxo de produção ao longo do HP. Com isso, se espera que o efeito sobre a função objetivo seja maior em cenários em que as restrições de área mínima estão aliadas à restrição de equilíbrio. Pelo mesmo motivo a inclusão de restrições de área mínima pode levar à infactibilidade do modelo de otimização. Desta forma, a flexibilização das restrições de equilíbrio e dos regimes de manejo aplicado aos talhões pode ser necessária. Isto implica na colheita de talhões fora dos limites comumente aplicados à idade de manejo e aos limites de flutuação na produção anual.

Como demonstrado na TABELA 5.2, com o aumento do limite mínimo de área, o número de restrições no modelo aumenta substancialmente, em proporção exponencial, e consequentemente a resolução do modelo demanda um maior tempo de processamento. Adicionalmente, a inclusão das variáveis binárias de decisão nos modelos de otimização torna necessária a utilização de algoritmos menos eficientes quando comparado a modelos de programação linear, em que a resolução pode ser feita através do algoritmo simplex. Apesar das variáveis inteiras e do grande número de restrições geradas para a formação do bloco de colheita, em todos os cenários foi possível obter respostas satisfatórias em um intervalo razoável de tempo para resolução. Em todos os modelos o gap entre o ótimo relaxado e a solução encontrada foi inferior a 1,5% com uma hora de resolução.

Entretanto, se nota que a resolução de problemas envolvendo área mínima de colheita apresenta formulação e resolução mais custosa quando comparados a problemas de área máxima de colheita. McDill e Manning (2012) obtiveram tempos de resolução para diferentes instâncias de modelos considerando área máxima de colheita igual a 255,5 segundos. Tóth (2005) estudando uma floresta com 300 talhões obteve tempos de resolução variando entre 245 e 6425 segundos. Constantino et al. (2008) resolveram diferentes instâncias de problemas ARM com tempos de resolução variando de menos de 1 a 7200 segundos.

Carvajal et al. (2012), aplicaram o modelo de conectividade dinâmica a seis florestas, variando o número de talhões entre 50 e 1363 talhões. A partir da resolução em um computador Xeon Quad-core com 32 GB de RAM, após 4 horas

de resolução, os autores encontraram gaps variando de 0,14 a 7,62%. Para a menor floresta, com 50 talhões o ótimo foi obtido após 1,87 horas. Segundo os autores, a dificuldade de resolução apresenta variabilidade, não está sempre relacionada ao tamanho da floresta estudada, uma vez que as maiores florestas tiveram resolução mais fácil.

McDill e Rebain (2003), obtiveram um gap de 2% em 17 horas de resolução em uma floresta composta por 50 talhões, utilizando o programa CPLEX 7.1 em um computador com 1 GB de RAM.

As diferenças na dificuldade de resolução dos problemas, além do tamanho da floresta, que tem impacto sobre o número de restrições, pode estar relacionado às características da floresta. Como a possibilidade de agregar os talhões em blocos, respeitando as demais restrições, como as restrições de equilíbrio. Em casos em que diferentes regiões da floresta apresentem estoques diferentes, a formação de blocos pode se mostrar uma tarefa custosa à otimização.

5.4 CONCLUSÕES

Todos os modelos testados são capazes de formar blocos de colheita atendendo os limites mínimos de área propostos. Entretanto em alguns casos a ocorrência de pequenos blocos isolados em um mesmo ano do HP pode levar a respostas não satisfatórias com relação à movimentação das máquinas de colheita.

A formulação de *ring inequalities* proposta por Carvajal et al. (2012) apresenta os melhores resultados, com número reduzido de restrições e respostas mais satisfatórias para o VPL.

A amplitude dos blocos formados através do modelo baseado na formulação de McDill e Rebain (2003) tem grande influência no número de restrições e na resposta obtida. Por um lado, quanto menor a amplitude, menor o número de restrições. Por outro lado, quanto menor a amplitude, maior a probabilidade de ocorrência de talhões não incluídos em nenhum bloco e maior a limitação no número de soluções possíveis, podendo levar a respostas de qualidade inferior.

O impacto das restrições de área mínima sobre a função objetivo são aceitáveis em todos os cenários gerados, apresentando potencial para minimização dos custos de colheita, reduzindo a movimentação de máquinas e custos com manutenção e construção de estradas florestais.

A inclusão de restrições de área mínima aumenta significativamente o modelo de otimização, com a inclusão de grande número de restrições envolvendo variáveis binárias. As restrições de área mínima se mostraram mais complexas que as restrições clássicas para controlar área máxima de colheita.

As características da área de estudo, no que se refere à área média, limite de área aplicado, número de talhões, número de adjacências entre os talhões, bem como os diferentes estoques em cada talhão tem grande influência no número de restrições geradas, bem como no tempo de resolução do modelo. Quanto mais próximo de blocos os talhões estiverem organizados em um cenário livre, mais fácil será a solução do modelo.

5.5 BIBLIOGRAFIA

- CARVAJAL, R.; CONSTANTINO, M.; GOYCOOLEA, M. VIELMA, J. P.; WEINTRAUB, A. **Imposing Connectivity Constraints in Forest Planning Models**. Não publicado, 2012. Disponível em: <http://www.pitt.edu/~jvielma/publications/OLDGROWTH10.pdf>
- CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; BORGES, J. G. A **New Mixed-Integer Programming Model for Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions**. Operations Research, Vol. 56 n. 3, 2008, p. 542-551.
- GUSTAFSON, E. J. **Expanding the scale of forest management: allocating timber harvests in time and space**. Forest Ecology and Management (1996) 27-39.
- GUSTAFSON, E. J. **Clustering Timber Harvests and the Effect of Dynamic Forest Management Policy on Forest Fragmentation**. Ecosystems (1998): 484-492.
- ÖHMAN, K. ERIKSOON, L. **Aggregating Harvest Activities in Long Term Forest Planning by Minimizing Harvest Area Perimeters**. Silva Fennica 44, Volume 1, p 77-89, 2010.
- ÖHMAN, K. LÄMAS, T. **Clustering of harvest activities in multi-objective long-term forest planning**. Forest Ecology and Management 176 (2003) 161-171.
- MCDILL, M.; MANNING, P. J. **Optimal Parameter settings for solving harvest scheduling models with adjacency constraints**. Math. Comput. For. Nat.-Res. Sci. 4(1), 2012.
- MCDILL, M.; REBAIN, S. **A Mixed-Integer Formulation of the Minimum Patch Size Problem**. Forest Science 49(4), 2003.
- MCDILL, M.; REBAIN, S.; BRAZE, J. **Harvesting scheduling with area based adjacency constraints**. Forest Science 48, 2002.
- SMALTSCHINSKI, T.; SEELING, U.; BECKER, G. **Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimized harvest scheduling**. Annals of Forest Science (2012) 69:651–657.
- TÓTH, S. F. **Modeling timber and non-timber trade-offs in spatially-explicit forest planning**. Tese de doutorado, The Pennsylvania State University, 2005.

TÓTH, S. F.; MCDILL, M.; REBAIN, S. **Finding the Efficient Frontier of a Bi-Criteria, Spatially Explicit, Harvest Scheduling Problem.** Forest Science 52(1) 2006.

WEI, Y.; HOGANSON, H. M. **Scheduling forest core area production using mixed integer programming.** Can. J. For. Res. 37: 1924–1932 (2007).

6 AGREGAÇÃO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA FLORESTAL ATRAVÉS DE FORMULAÇÕES DE PLIM

RESUMO

A inclusão de aspectos relacionados aos padrões espaciais construídos a partir da colheita florestal é um importante componente do planejamento florestal. A partir destas informações é possível realizar o planejamento operacional de forma adequada, no que se refere à alocação de máquinas e recursos. A realização destas operações de manejo é mais eficiente com a agregação dos talhões selecionados para a colheita, pois a partir disto é possível reduzir a movimentação das máquinas dentro da área e reduzir os custos de construção e manutenção de estradas. Neste contexto o objetivo deste estudo foi o de avaliar diferentes estratégias para a agregação das atividades de colheita em uma floresta composta por 236 talhões de *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.* Modelos de PLIM e *Goal Programming* foram utilizados. As abordagens propostas apresentaram respostas aceitáveis e foram capazes de promover a formação de blocos de colheita, com reduções aceitáveis no VPL florestal, para a maioria dos casos. Os modelos de *Goal Programming*, com inclusão de critérios para a maximização de adjacências à função objetivo se mostrou a mais adequada para o caso estudado.

Palavras chave: agregação da colheita florestal; *Goal Programming*; planejamento florestal

ABSTRACT

The inclusion of criteria related to the spatial patterns resulting from the forest harvest activities is an important component of forest planning. Through these informations, it is possible to perform the operational planning in a suitable way, related to the allocation of machinery and resources involved in forest harvest operations. The forest management operations is more efficient when clustering forest harvest activities. Through the aggregation of these operations, it is possible to reduce the displacement of machinery and reduce the costs related to constructions and maintenance of the road network. In this context, the objective of this study was to evaluate different strategies for aggregating forest harvest in an area composed by 236 stands. MILP and *Goal Programming* approaches were applied. The proposed approaches presented suitable responses and were capable to promote the formation of harvesting blocks, with acceptable reduction on the NPV of the forest for the major part of cases. The *Goal Programming* models, with the inclusion of criteria to maximize adjacencies in the objective function showed to be the best alternative for the study case.

Key words: clustering forest harvest; Goal Programming; forest planning

6.1 INTRODUÇÃO

A configuração espacial dos talhões selecionados para a colheita é um importante aspecto a ser considerado no planejamento florestal. As informações referentes à distribuição dos talhões a serem colhidos dentro de uma área florestal fornecem subsídios para a realização do planejamento operacional (LI et al., 2010), permitindo alocar de maneira adequada o maquinário e recursos envolvidos nas operações de manejo. Ainda deve-se considerar que a alocação destes recursos deve ser feita de maneira a se obter o maior rendimento possível, visando garantir a competitividade das empresas no mercado.

Notadamente a eficiência das atividades de colheita, envolvendo a organização do maquinário e transporte de toras, é significativamente melhorada quando os talhões estão agregados (SMALTSCHINSKI et al., 2012). A partir da agregação dos talhões a movimentação das máquinas de colheita é reduzida, minimizando o número de horas improdutivas. Também é possível reduzir os investimentos em estradas, pois as operações de manutenção de estradas para o transporte de toras, assim como as operações de colheita, se tornam mais eficientes e o número de vias necessárias para o escoamento da produção é reduzido.

Tendo em vista a importância do tema, é natural pensar em alternativas para incluir requisitos de conectividade em modelos de planejamento florestal. Entretanto, incluir estas relações espaciais no planejamento de longo prazo causa um aumento na complexidade desta tarefa, pois o modelo de agendamento da colheita requer não só a caracterização dos talhões, mas também do estado de seus vizinhos (Öhman e Låmas, 2001). Segundo Öhman e Eriksson (2010), uma série de abordagens foi proposta na literatura para expressar a agregação dos talhões em modelos de otimização. Segundo os autores, uma alternativa é incluir no modelo os custos de construção e manutenção de estradas e parâmetros de acessibilidade. Entretanto, estes modelos possuem a tendência de serem muito grandes. Outra alternativa é a modelagem direta da agregação das atividades de

colheita em pixels, onde a agregação se dá a partir de um critério de VPL que recompensa redução de custos através da colheita de pixels adjacentes.

Gustafson (1998) apresenta uma estratégia denominada zoneamento dinâmico, em que as áreas de colheita são agregadas a partir da divisão da floresta em subzonas e permitindo a colheita em apenas uma subzona em um mesmo período.

Öhman e Låmas (2003) apresentaram um modelo para agregação das atividades de colheita em um modelo de programação multiobjetivo a partir da inclusão de um critério não linear denominado de volume efetivo, com objetivo de agregar as áreas de colheita no tempo e espaço. Öhman e Eriksson (2010) propuseram uma abordagem para agregação dos talhões a partir da modificação da função objetivo. O método proposto consiste em minimizar o perímetro externo da área de colheita, a partir da redução do perímetro total quando talhões adjacentes são colhidos no mesmo período. Este critério foi introduzido em um modelo de programação multiobjetivo, juntamente com uma função de maximização do VPL, para resolver o problema em uma floresta composta por 2821 talhões.

Smaltschinski et al. (2012) propõe uma análise de cluster para a agregação dos talhões na colheita. No método proposto pelos autores, são determinadas distâncias entre os talhões através do cálculo do caminho mínimo entre estes talhões na rede viária da floresta. A partir destas informações os talhões são combinados a clusters caso a distância entre os talhões dentro do cluster sejam inferiores a um limite definido.

Apesar da importância do tema de agregação das atividades de colheita, existem poucas pesquisas que tratam deste problema. O objetivo do presente estudo foi avaliar a eficácia de três diferentes formulações de problemas de Programação Linear Inteira para buscar a conectividade das áreas de colheita. Adicionalmente foi avaliado o efeito das restrições de conectividade sobre a receita e o volume de madeira produzido pela floresta. As abordagens propostas consistem

em maximizar o número de adjacência a cada ano do horizonte de planejamento, propiciando a formação de áreas contíguas de colheita.

6.2 MATERIAIS E MÉTODOS

6.2.1 Área de estudo

Como área de estudo foi utilizada uma floresta de *Pinus spp* e *Eucalyptus spp*, localizada nos municípios de Bituruna e General Carneiro, Paraná, entre as coordenadas 26°13'58,31" e 26°22'5,634" S e 51°34'14,6 e 51°30'26,14" W. O clima segundo Köppen é classificado como Cfb: sub-tropical úmido mesotérmico, com verões frescos e invernos com ocorrências de geadas severas e frequentes.

A área é composta por 236 talhões, sendo 18 talhões da espécie *Eucalyptus spp*, 21 talhões de *Pinus spp* e 197 talhões de *Pinus taeda*, com uma área total de 2365,8 hectares. A área média dos talhões é de 10,3 ha e o número médio de adjacências por talhão é igual a 3.

6.2.2 Modelos testados

Tendo em vista a dificuldade de resolução de problemas de otimização combinatória em grafos com grande número de vértices, fato que ocorre de maneira frequente quando se aplica esse tipo de conceito em problemas florestais, é possível alterar a formulação do problema de maneira a se obter um problema de resolução mais simples. Uma alternativa é a utilização de modelos que promovem, mas não garantem a conectividade das áreas de colheita. Uma estratégia para a obtenção de modelos mais compactos é a alteração na função objetivo do modelo de planejamento.

Uma alternativa para este tipo de modelo é a maximização das adjacências dos talhões a cada ano do horizonte de planejamento. Uma primeira tentativa de modelagem utilizada para a maximização das adjacências foi a utilização de uma função objetivo de minimização do grau residual de cada talhão no modelo. Em um grafo $G = (V, A)$, o grau de cada vértice representado por $d(v)$ representa o número arestas incidentes a este vértice. Considerando k como o número potencial de arestas incidentes ao vértice v , o grau residual de v é dado pela diferença entre $d(v)$ e k (BROWN et al., 2005).

Aplicando estes conceitos a um problema de planejamento florestal, podemos considerar cada talhão como um vértice de um grafo e o número de talhões adjacentes como o número potencial de arestas incidentes a este talhão, uma vez que pode ser determinada uma aresta ligando cada par de talhões adjacentes. O grau de um talhão pode ser considerado como o número de talhões adjacentes ao talhão considerado, que sofrem o corte raso no mesmo ano deste talhão. A partir da minimização da diferença entre o número potencial de talhões adjacentes a serem colhidos e os talhões adjacentes efetivamente colhidos no mesmo ano para um determinado talhão, é possível promover a agregação das áreas de colheita.

Para a formulação deste modelo foi introduzida uma variável D_{ij} , representando o grau residual de cada talhão i . A função objetivo de maximização do VPL foi transformada em uma restrição. Para tal, um modelo livre foi resolvido. A partir do VPL e volume total obtido na solução do modelo livre, foram determinados limites mínimos para ambos os parâmetros. Como o objetivo da agregação dos talhões na colheita é a minimização dos custos e aumento da lucratividade não é interessante uma grande redução no VPL ou no volume total apenas para promover a agregação dos talhões. Desta forma foi determinada uma porcentagem de manutenção no VPL e volume total obtido no cenário livre de 5 % e este valor foi introduzido como restrição no modelo. Desta forma é possível estabelecer a seguinte formulação:

Minimizar

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} D_{ij} \quad (6.1)$$

Sujeito a

$$\sum_{k \in \delta(i)} x_{kj} \geq n_i x_{ij} - D_{ij} \quad \forall i, \forall j \quad (6.2)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} c_{ij} x_{ij} \geq P \quad (6.3)$$

$$\sum_{j=1}^{HP} x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (6.4)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq 0.85 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (6.5)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq 1.15 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (6.6)$$

$$x_{ij}, x_{kj} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (6.7)$$

$$D_{ij} \in \mathbb{Z}^+ \quad (6.8)$$

Onde:

N : Número de talhões da floresta

HP : Número de anos do horizonte de planejamento

D_{ij} : grau residual do talhão i no ano j

- x_{ij} : variável binária que assume valor 1 caso o talhão i seja colhido no ano j ou valor 0 caso contrário
- n_i : número de talhões adjacentes ao talhão i
- $\delta(i)$: conjunto de talhões adjacentes ao talhão i
- P : limite inferior para a soma do VPL ao final do HP
- c_{ij} : Valor Presente Líquido gerado pelo talhão i quando colhido no ano j
- v_{ij} : volume gerado pelo talhão i quando colhido no ano j

A função objetivo (6.1) visa minimização do grau residual de cada vértice, buscando que no ano em que um talhão sofra o corte raso, o maior número de vizinhos possível também sofra o corte raso. A restrição (6.2) impõe que a diferença entre a soma dos talhões vizinhos a determinado talhão que sofrem o corte raso em determinado ano do HP e o número total de vizinhos seja igual ao grau residual do talhão considerado. A restrição (6.3) visa garantir que o VPL gerado ao final do HP seja superior a um limite mínimo, estabelecido com base no cenário livre. A restrição (6.4) impõe que a cada talhão seja apenas aplicado um regime de manejo. As restrições (6.5) e (6.6) são as restrições de equilíbrio, que impõe que a cada ano o volume gerado se encontre entre os limites inferior e superior determinados.

Uma segunda abordagem utilizada foi a formulação da função objetivo representando diretamente a maximização das adjacências. A partir da maximização dos pares de talhões adjacentes em um determinado ano do HP é possível induzir a uma agregação das áreas de colheita. Para tal é necessária a introdução de variáveis auxiliares representando as adjacências entre os talhões. As mesmas variáveis binárias representando as arestas em um problema da arborescência mínima podem ser utilizadas para este fim. Desta forma é possível formular o problema como segue:

Maximizar

$$\sum_{(i,k) \in \delta(E)} \sum_{j=1}^{HP} y_{ikj} \quad (6.9)$$

Sujeito a

$$x_{ij} \geq y_{ikj}, x_{kj} \geq y_{ikj} \quad \forall j, \forall (i, k) \in \delta(E) \quad (6.10)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} c_{ij} x_{ij} \geq P \quad (6.11)$$

$$\sum_{j=1}^{HP} x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (6.12)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq 0.85 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (6.13)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq 1.15 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (6.14)$$

$$x_{ij}, x_{kj}, y_{ikj} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (6.15)$$

Onde:

N : Número de talhões da floresta

HP : Número de anos do horizonte de planejamento

y_{ikj} : variável binária que assume valor 1 caso a aresta (i, k) seja escolhida para fazer parte da solução no ano j ou valor 0 caso contrário

x_{ij}, x_{kj} : variável binária que assume valor 1 caso o talhão i ou k seja colhido no ano j ou valor 0 caso contrário

- $\delta(E)$: conjunto de arestas entre talhões adjacentes
- P : limite inferior para a soma do VPL ao final do HP
- c_{ij} : Valor Presente Líquido gerado pelo talhão i quando colhido no ano j
- v_{ij} : volume gerado pelo talhão i quando colhido no ano j

A função objetivo (6.9) visa maximizar a soma de arestas entre talhões adjacentes, favorecendo a agregação dos talhões na colheita. A restrição (6.10) impõe que se uma aresta foi selecionada para fazer parte da solução em determinado ano do HP, os talhões correspondentes a esta aresta seja colhidos neste mesmo ano. As restrições (6.11) impõe limites mínimos para o VPL total obtido na solução. A restrição (6.12) impõe que apenas 1 opção de manejo seja escolhida para cada talhão e as restrições (6.13) e (6.14) são as restrições de equilíbrio da produção.

Com objetivo de melhorar a solução obtida pelos modelos de maximização de adjacência foi introduzida uma restrição extra a ambos os modelos. Como é possível que nestes modelos, ocorrendo a agregação de um grande número de talhões em determinada região, resultando em um grande número de adjacências, a ocorrência de poucos talhões isolados em um mesmo ano não apresente grande impacto à função objetivo.

Como o objetivo dos modelos é a redução das movimentações do maquinário entre os talhões, não é interessante a ocorrência destes talhões isolados na solução. Para minimizar este efeito foi introduzida uma restrição baseada no algoritmo de caminho mínimo de Dijkstra. O problema do caminho mínimo é enunciado da seguinte forma: considerando um grafo ou rede G , com m nós, n arcos e um custo c_{ij} associado com cada arco (i, j) em G . O problema do caminho mínimo consiste em encontrar o caminho mínimo (de menor custo) de um dado nó u aos outros nós m em G . O custo do caminho é a soma dos custos dos arcos neste

caminho (BAZARAA et al., 2010). Este tipo de problema com origem única e arcos de custos não negativos pode ser resolvido pelo algoritmo de Dijkstra.

Os algoritmos de caminho mínimo são baseados em um procedimento conhecido como *relaxamento*. Relaxar uma aresta $v \rightarrow w$ significa testar se o melhor caminho conhecido entre um vértice de origem s e o vértice w é ir de s até v e posteriormente de v até w . Caso isto ocorra, as informações referentes a este caminho são atualizadas (SEdgeWICK e WAYNE, 2011).

O algoritmo de Dijkstra computa uma árvore de caminhos mínimos a partir de um vértice de origem s . O algoritmo começa com a inicialização de distâncias, onde a origem possui valor zero e os outros vértices possuem um valor tão grande quanto possível. Então é feito o relaxamento e se adiciona o vértice com menor distância até a origem, ainda não presente na árvore de caminho mínimo, continuando este processo até que todos os vértices estejam presentes na árvore ou até que todos os vértices não presentes na árvore tenham uma distância finita até a origem (SEdgeWICK e WAYNE, 2011).

Considerando novamente a área como um grafo direcionado, onde cada talhão representa um nó e atribuindo um custo igual a um para cada arco ligando pares de talhões, foi possível obter as distâncias mínimas entre todos os pares de talhões presentes na floresta. Para tal, cada talhão foi utilizado como origem no algoritmo, permitindo a construção de uma matriz de distâncias mínimas, expressa em número de arcos separando os pares de talhões.

Considerando um caso extremo de solução para uma área de colheita conectada, a distância máxima entre um par de talhões se dá no caso em que os talhões se configuram como uma linha na resposta. Neste caso a distância entre as extremidades será igual ao número de talhões presentes menos um. Desta forma foi introduzida a seguinte restrição com objetivo de evitar distâncias ineficazes entre os talhões selecionados para o corte raso em um mesmo ano do horizonte de planejamento:

$$d_{ik}(x_{ij} + x_{kj} - 1) \leq \sum_{n=1}^N x_{nj} - 1 \quad \forall i, \forall k, \forall j \quad (6.16)$$

Onde:

N : Número de talhões da floresta

d_{ik} - distância mínima em número de arcos do talhão i ao talhão k

x_{ij} - variável binária que assume valor 1 caso o talhão i seja colhido no ano j ou valor 0 caso contrário

A restrição (6.16) impõe as distâncias expressas em termos do caminho mínimo entre dois talhões i e k selecionados para o corte raso em um mesmo ano do horizonte de planejamento seja igual ou inferior ao número de talhões selecionados para o corte raso neste ano menos um. Pois, em um caso extremo, essa é a maior distância possível entre um par de talhões em uma área de colheita conectada.

Uma segunda abordagem de resolução foi aplicada aos modelos citados anteriormente. Considerando a agregação das atividades de colheita e a maximização do VPL total como objetivos conflitantes, um modelo de *Goal Programming* foi aplicado para ambas as formulações. *Goal programming* é um ramo da Pesquisa Operacional, que permite a inclusão de múltiplos objetivos na função objetivo do modelo de otimização. Em cenários de grande complexidade e em situações em que a factibilização do modelo se mostra uma tarefa trabalhosa, a transformação para modelos mais flexíveis de *Goal Programming* se mostra uma alternativa viável para produzir soluções com boa qualidade.

Modelos de *Goal Programming* vêm sendo aplicados na área florestal principalmente em questões ligadas ao planejamento de múltiplo uso de florestas e na elaboração de políticas florestais. Nestes cenários tipicamente vários *stakeholders* são responsáveis pela tomada de decisão e cada um com diferentes

objetivos relacionados ao manejo da floresta. Nestes cenários a aplicação de modelos multiobjetivo se tornam uma poderosa ferramenta para auxiliar a tomada de decisão.

Algumas alterações na função objetivo e restrições são necessárias para adaptar um modelo de PL à abordagem multiobjetivo. Em modelos de *Goal Programming*, as variáveis presentes na função objetivo representam desvios em relação aos limites adotados nas restrições, relativos às variáveis representando os diferentes objetivos determinados. Desta forma, as restrições referentes às variáveis objetivo são transformadas em igualdades, adicionando a cada restrição duas variáveis extra. Uma destas variáveis extra representa o desvio para mais e a outra o desvio para menos, com relação ao limite de determinado (BUONGIORNO e GILLES, 2003).

A seguir um exemplo de modelagem de um problema de planejamento multiobjectivo básico é apresentado. Considerando um cenário em que se espera maximizar o VPL da floresta e manter os níveis de produção constantes possível ao longo do horizonte de planejamento, tem-se o seguinte modelo de PL:

Maximizar

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} c_{ij} x_{ij} \quad (6.17)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq LI \quad \forall j \quad (6.18)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq LS \quad \forall j \quad (6.19)$$

$$\sum_{j=1}^{HP} x_{ij} \leq A_i \quad \forall i \quad (6.20)$$

Onde:

N : Número de talhões da floresta

HP : Número de anos do horizonte de planejamento

LI : Limite inferior de volume

LS : Limite superior de volume

x_{ij} : área do talhão i colhida no ano j

c_{ij} : VPL gerado pelo talhão i quando colhido no ano j por unidade de área

v_{ij} : volume gerado pelo talhão i quando colhido no ano j por unidade de área

A_i : área do talhão i

No modelo em questão a equação (6.17) representa a função objetivo de maximização do VPL, as restrições (6.18) e (6.19) representam o limite de volume produzido a cada ano do HP e a restrição (6.20) representa os limites de área disponível. Considerando uma formulação de múltiplos objetivos, se faz necessário a alteração da função objetivo e das restrições (6.18) e (6.19) no modelo.

Inicialmente as restrições de volume e a função objetivo de maximização do VPL devem ser transformadas em igualdades, incluindo as variáveis que representam os desvios com relação aos limites estabelecidos:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} c_{ij} x_{ij} - V^+ + V^- \quad (6.21)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} - LI^+ + LI^- = LI \quad \forall j \quad (6.22)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} - LS^+ + LS^- = LS \quad \forall j \quad (6.23)$$

Na restrição (6.21) as variáveis V^+ e V^- representam os desvios para mais e para menos em relação ao limite de VPL estabelecido. O mesmo se aplica à restrição (6.22) e (6.23), onde LS^+ e LI^+ representam os limites para mais e LS^- e LI^- representam os limites para menos em relação aos volumes anuais de produção.

Considerando o exposto, em uma situação de planejamento multiobjetivo, o alvo é a minimização dos desvios em relação aos limites estabelecidos. Desta forma tem-se a seguinte função objetivo para o problema proposto:

Minimizar

$$w_1 V^- + w_2 LS^+ + w_3 LI^- \quad (6.24)$$

Os coeficientes w_1 , w_2 e w_3 presentes na equação (6.24) representam os pesos relativos de cada variável de desvio. Segundo BUONGIORNO e GILLES (2003), os pesos em funções objetivo de *Goal Programming* possuem dois propósitos. O primeiro deles é o de expressar todos os diferentes objetivos em uma escala comparável e o segundo é o de expressar a importância relativa de cada objetivo. Neste exemplo, caso o gestor da floresta considerar mais importante a obtenção de um alto VPL do que a manutenção de uma produção constante, o peso do desvio do VPL para menos seria maior que os desvios relacionados à manutenção da produção. Para simplificar a função objetivo, apenas os desvios mais importantes são incorporados. Uma vez que a obtenção de um VPL maior que o limite determinado é favorável, apenas o desvio para menos V^- é incluído na FO. O mesmo ocorre com os limites de produção, sendo indesejáveis apenas o desvio para menos (LI^-), relacionado ao limite inferior de produção e o desvio para mais LS^+ , relacionado ao limite superior de produção.

Uma das tarefas mais desafiadoras na construção de modelos de *Goal Programming* é definir os pesos de cada objetivo no modelo. A definição destas importâncias é subjetiva e depende do analista e *stakeholders*. Desta forma demanda experiência e muitas vezes um processo de tentativa e erro, até que a resposta se torne satisfatória (BUONGIORNO & GILLES, 2003).

Considerando o exposto, são introduzidos a seguir os modelos de planejamento visando a agregação das áreas de colheita, a partir da maximização de adjacências em modelos de otimização multiobjetivo.

Minimizar

$$w_1 K^+ + w_2 VPL^- \quad (6.25)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} D_{ij} + K^- - K^+ = B \quad (6.26)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} c_{ij} x_{ij} + VPL^- - VPL^+ = P \quad (6.27)$$

$$\sum_{k \in \delta(i)} x_{kj} \geq n_i x_{ij} - D_{ij} \quad \forall i, \forall j \quad (6.28)$$

$$\sum_{j=1}^{HP} x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (6.29)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq 0.85 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (6.30)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq 1.15 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (6.31)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j \quad (6.32)$$

$$D_{ij} \in Z^+ \quad (6.33)$$

Onde:

N : Número de talhões da floresta

HP : Número de anos do horizonte de planejamento

w_1, w_2 : pesos relativos para os critérios da função objetivo

B : limite estabelecido para a soma do grau residual de todos os talhões

P : limite estabelecido para o VPL total da floresta

K^+, K^- : desvios em relação ao limite de grau residual

VPL^+ : desvio para mais em relação ao limite de VPL

VPL^- : desvio para menos em relação ao limite de VPL

D_{ij} : grau residual do talhão i no ano j

x_{ij} : variável binária que assume valor 1 caso o talhão i seja submetido ao regime de manejo j ou valor 0 caso contrário

n_i : número de talhões adjacentes ao talhão i

$\delta(i)$: conjunto de talhões adjacentes ao talhão i

c_{ij} : Valor Presente Líquido gerado pelo talhão i quando colhido no ano j

v_{ij} : volume gerado pelo talhão i quando colhido no ano j

A equação (6.25) representa a função objetivo do modelo de planejamento. Os coeficientes w_1 e w_2 representam os pesos relativos de cada componente presente na FO. Foram testados inicialmente pesos iguais para os dois critérios, em seguida impondo peso 2 para o VPL e 1 para a minimização do grau e por fim peso 1 para o VPL e 2 para a minimização do grau residual. Com objetivo de permitir comparações, os dois critérios foram divididos por seus limites respectivos. Neste caso o peso w_1 foi dividido por B e w_2 por P .

Nesta equação se busca incluir como objetivos o VPL total da floresta e a minimização da soma do grau residual de cada talhão. Desta forma, são indesejáveis o desvio para menos no VPL (VPL^-) e o desvio para mais na soma do grau residual (K^+), sendo estas duas variáveis incluídas na FO de minimização.

A restrição (6.26) é a restrição que determina o limite da soma do grau residual dos talhões, incluindo os desvios para mais e menos, representando uma restrição de GP. O resultado obtido no modelo de PLIM exposto anteriormente, foi utilizado como limite para esta restrição (B). A restrição (6.27) representa o limite para a soma do VPL da floresta. O limite desta restrição foi determinado como o resultado do modelo de planejamento sem restrições de adjacência. Os desvios para mais e menos são representados pelas variáveis VPL^+ e VPL^- .

A restrição (6.28) relaciona a variável do grau residual com a variável de binária de decisão de colheita de cada talhão ao longo do HP.

As restrições (6.29) - (6.33) representam o mesmo conjunto de restrições (6.4) – (6.8) apresentados anteriormente.

O modelo de GP correspondente à maximização de adjacências é apresentado a seguir.

Minimizar

$$w_1 Z^- + w_2 VPL^- \quad (6.34)$$

Sujeito a

$$\sum_{(i,k) \in \delta(E)} \sum_{j=1}^{HP} y_{ikj} + Z^- - Z^+ = F \quad (6.35)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} c_{ij} x_{ij} + VPL^- - VPL^+ = P \quad (6.36)$$

$$x_{ij} \geq y_{ikj}, x_{kj} \geq y_{ikj} \quad \forall j, \forall (i, k) \in \delta(E) \quad (6.37)$$

$$\sum_{j=1}^{HP} x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (6.38)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq 0.85 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (6.39)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq 1.15 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (6.40)$$

$$x_{ij}, x_{kj}, y_{ikj} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (6.41)$$

Onde:

N : Número de talhões da floresta

HP : Número de anos do horizonte de planejamento

w_1, w_2 : pesos relativos para os critérios da função objetivo

F : limite estabelecido para a soma de adjacências ao longo do HP

P : limite estabelecido para o VPL total da floresta

Z^+, Z^- : desvios em relação ao limite de adjacências

- VPL^+ : desvio para mais em relação ao limite de VPL
- VPL^- : desvio para menos em relação ao limite de VPL
- y_{ikj} : variável binária que toma valor 1 caso a aresta (i, k) seja escolhida para fazer parte da solução no ano j ou valor 0 caso contrário
- x_{ij} : variável binária que toma valor 1 caso o talhão i seja submetido ao regime de manejo j ou valor 0 caso contrário
- $\delta(E)$: conjunto de arestas entre talhões adjacentes
- c_{ij} : Valor Presente Líquido gerado pelo talhão i quando submetido ao regime de manejo j
- v_{ij} : volume gerado pelo talhão i quando submetido ao regime de manejo j

A função objetivo do modelo é dada pela equação (6.34). Novamente os coeficientes w_1 e w_2 representam os pesos relativos de cada componente da FO. Foram testados inicialmente pesos iguais para os dois critérios, em seguida impondo peso 2 para o VPL e 1 para a maximização de adjacências e por fim 1 para o VPL e 2 para maximização de adjacências. Com objetivo de permitir comparações, os dois critérios foram divididos por seus limites respectivos. Neste caso o peso w_1 foi dividido por B e w_2 por P .

Nesta equação se busca incluir como objetivos o VPL total da floresta e a maximização das adjacências entre talhões. Desta forma, são indesejáveis os desvios para menos tanto no VPL (VPL^-) como na soma de adjacências (Z^-), sendo estas duas variáveis incluídas na FO de minimização.

A restrição (6.35) é a restrição relacionada ao número de adjacências obtidas ao longo do HP, incluindo os desvios para mais e menos, representando uma restrição de GP. O resultado obtido no modelo de PLIM para maximização de adjacências exposto anteriormente, foi utilizado como limite para esta restrição (B). A restrição (6.36) representa o limite para a soma do VPL da floresta. O limite desta

restrição foi determinado como o resultado do modelo de planejamento sem restrições de adjacência. Os desvios para mais e menos são representados pelas variáveis VPL^+ e VPL^- .

A restrição (6.37) é a mesma restrição (6.10) apresentada anteriormente e as restrições (6.38) - (6.41) representam o mesmo conjunto de restrições (6.12) – (6.15).

O horizonte de planejamento adotado foi de 16 anos, em regimes de manejo sem desbaste. Inicialmente foram testados os cenários para maximização de adjacências sem a inclusão das restrições geradas pelo algoritmo de Dijkstra. Posteriormente estas restrições foram incorporadas ao modelo nos cinco primeiros anos do horizonte de planejamento. Posteriormente as duas formulações foram transformadas em modelos multiobjetivo, testando diferentes pesos para cada um dos critérios incluídos na função objetivo. Os modelos testados são apresentados na TABELA 6.1 a seguir.

TABELA 6.1 – CÉNARIOS TESTADOS

Cenário	Nome	Restrições
1	Livre	6.4, 6.5, 6.6
2	Min grau residual e equilíbrio	6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6
3	Max Adjacência e equilíbrio	6.10, 6.11, 6.12, 6.13, 6.14
4	Min grau residual, Dijkstra e equilíbrio	6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.16
5	Max Adjacência, Dijkstra e equilíbrio	6.10, 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.16
6	Min grau residual e max VPL, com pesos iguais	6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.30, 6.31

Cenário	Nome	Restrições
7	Min grau residual e VPL, com peso 1 para adjacências e peso 2 para VPL	6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.30, 6.31
8	Min grau residual e VPL, com peso 2 para adjacências e peso 1 para VPL	6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.30, 6.31
9	Max adjacências e VPL, com pesos iguais	6.35, 6.36, 6.37, 6.38, 6.39, 6.40
10	Max adjacências e VPL, com peso 1 para grau e peso 2 para VPL	6.35, 6.36, 6.37, 6.38, 6.39, 6.40
11	Max adjacências e VPL, com peso 2 para grau e peso 1 para VPL	6.35, 6.36, 6.37, 6.38, 6.39, 6.40

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos descritos foram testados em um computador com processador Intel® Core™ Duo CPU 2,93 GHz, com 4Mb de memória Ram. A partir da resolução foram obtidos os seguintes resultados após 3 horas de processamento:

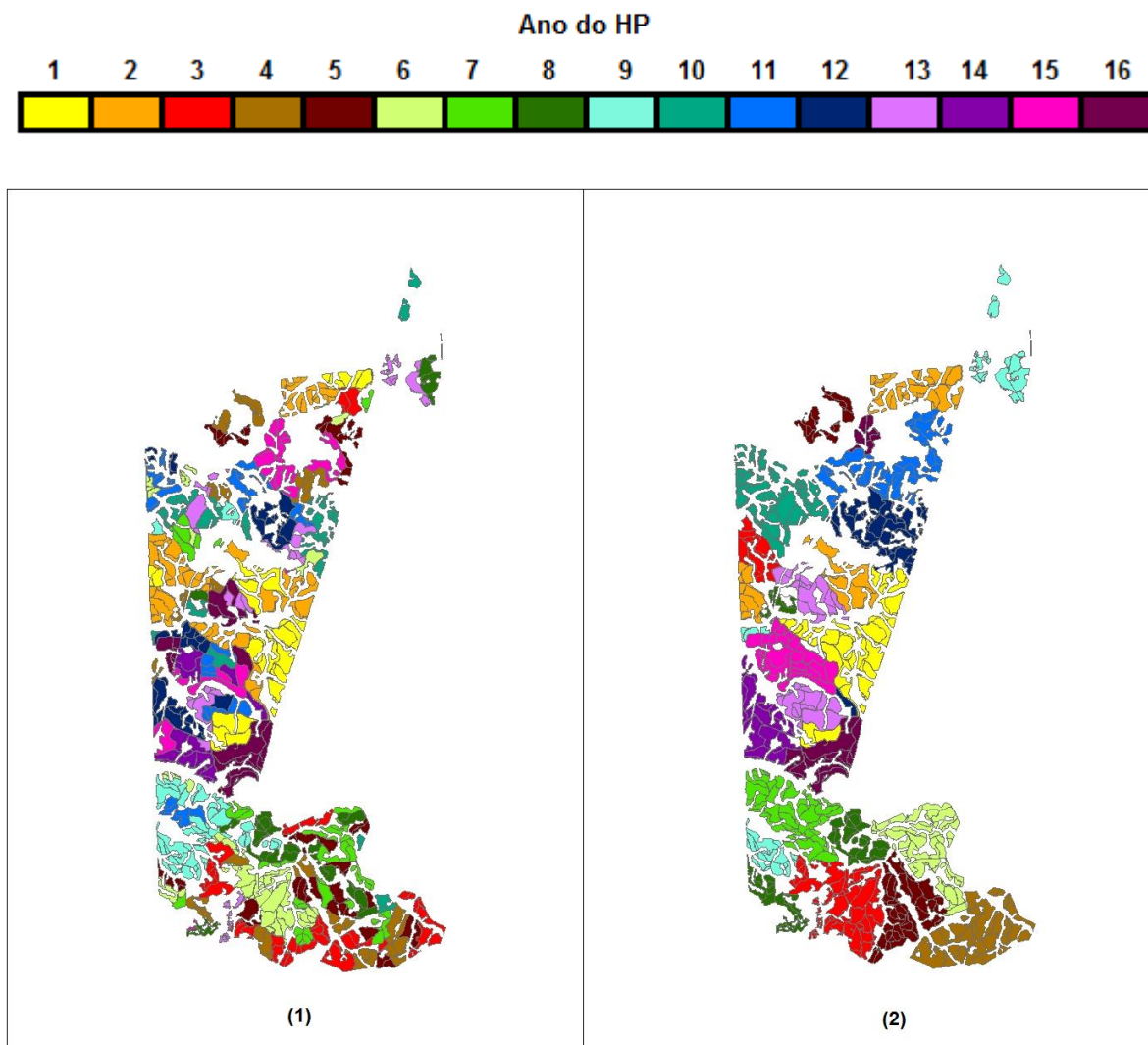


FIGURA 6.1 – CONTINUA

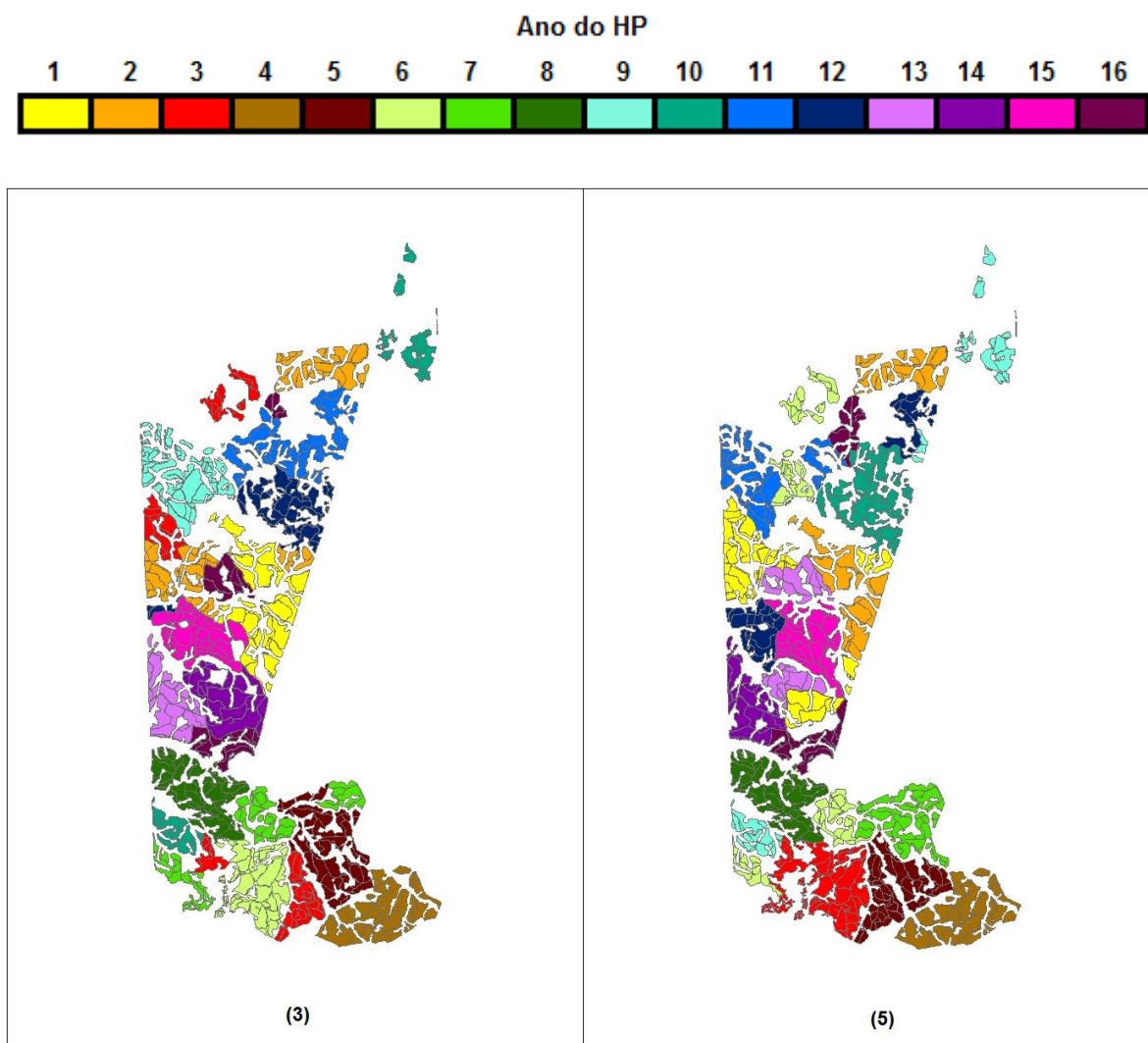


FIGURA 6.1 – AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA

Conforme os resultados apresentados na FIGURA 6.1, se observa que para o cenário (1) sem incorporação de critérios para a formação de blocos de colheita, o agendamento em alguns anos se apresenta fragmentado. Este comportamento pode ser observado para o ano 7 por exemplo, em vermelho. No cenário 2, com a função objetivo de minimização do grau residual se observa uma clara agregação das atividades de colheita ao longo do horizonte de planejamento. Entretanto em alguns anos do HP, como nos anos 8 e 9, as atividades de colheita parecem em

pequenos blocos e também ocorre a presença de talhões isolados. O cenário 3, com função objetivo de maximização das adjacências também apresentou resultados satisfatórios, ocorrendo a agregação das atividades de colheita ao longo do HP. De maneira geral a formulação considerando a maximização das adjacências foi mais eficiente na formação de blocos de colheita. Apesar de em alguns anos ocorrer a formação de pequenos blocos, as atividades não se apresentaram significativamente dispersas, como ocorreu nos anos 8 e 9 do cenário (2). Comparando-se os cenários (2) e (3) se observa que os blocos formados apresentaram configuração semelhante, em muitos casos apresentando os mesmos blocos, porém com mudanças no ano de colheita.

Tendo em vista que as formulações apresentadas favorecem a formação de blocos de colheita, porém não garante a formação dos mesmos, foi observada a fragmentação das áreas em alguns casos. Para reduzir esta fragmentação, a restrição baseada no algoritmo de caminho mínimo entre dois talhões foi introduzida. Considerando que o número de restrições introduzidas é proporcional ao quadrado do número de talhões, esta formulação aumentou consideravelmente a complexidade do modelo, inclusive causando a infactibilidade do cenário (4). No cenário (5), se observa que a restrição melhorou a qualidade da resposta e os blocos formados não se apresentaram separados por grandes distâncias. O agendamento dos talhões para a colheita apresentou significativa mudança, comparado ao cenário (3), no que se refere aos blocos formados. Tendo em vista o exposto, a restrição baseada no algoritmo de Dijkstra pode apresentar limitações em florestas com grande número de talhões, acarretando em um grande número de restrições.

Em todos os cenários testados se observa uma tendência na formação de blocos com formato aproximando-se de um formato circular. Estes núcleos apresentam grande quantidade de adjacências entre por talhão, portanto trazendo maior contribuição para a função objetivo tanto no cenário de maximização de adjacências, quanto no cenário de minimização do grau residual, do que uma configuração de talhões em disposição linear traria. Em algumas áreas de estudo,

esta característica dos modelos pode trazer obstáculos ao fluxo de produção quando os talhões adjacentes apresentarem grandes diferenças de estoque.

A formulação de minimização do grau residual se mostrou uma formulação mais fraca, comparada à maximização do número de adjacências. Apesar do número de restrições envolvidas na minimização do grau residual ser menor, a resolução do modelo se mostrou mais complexa. Com um tempo de processamento de duas horas o cenário (2) de minimização do grau residual apresentava um gap de 30% com relação ao valor ótimo, ao passo que a função objetivo de para maximização das adjacências apresentava um gap de apenas 3%. A inclusão do conjunto de restrições de caminho mínimo também aumentou significativamente a complexidade da resolução e com duas horas de processamento o cenário (5) apresentava um gap de 35% em relação ao ótimo relaxado.

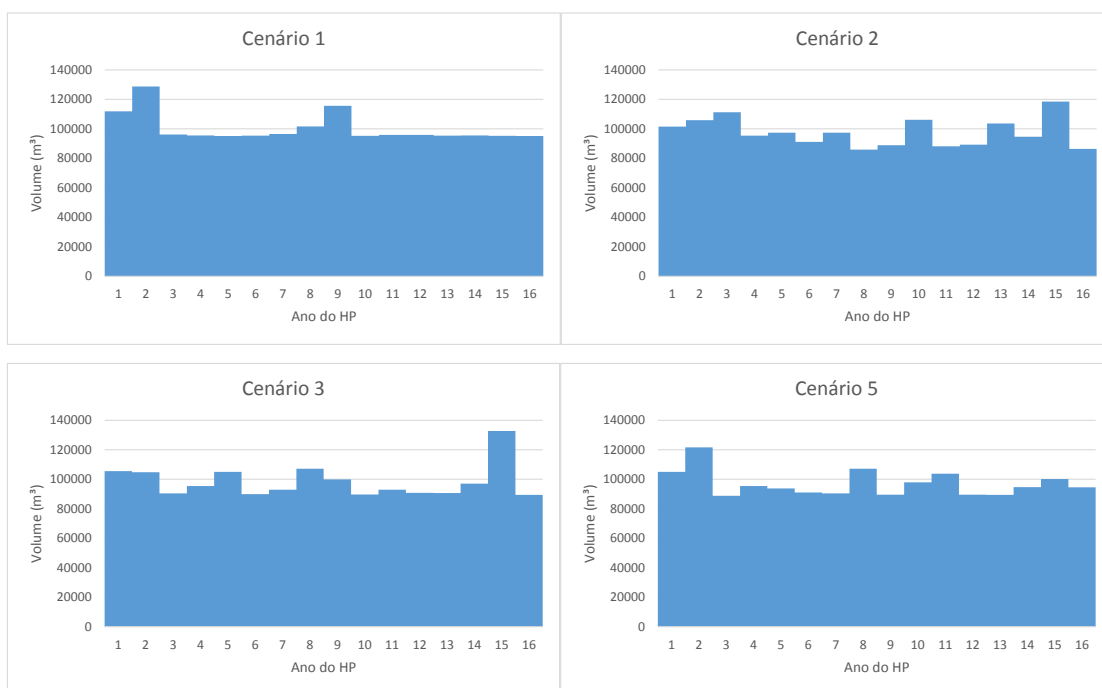


FIGURA 6.2 – VOLUMES ANUAIS DE PRODUÇÃO

Com base na FIGURA 6.2 se observa que a restrição de equilíbrio imposta foi respeitada, com variações menores que 15% tomando como base o ano 1 do HP. É possível observar que nos cenários (2), (3) e (5), em decorrência da formação dos blocos de colheita houve uma maior flutuação nos valores anuais de produção, quando comparados ao cenário (1), sem inclusão de critérios para formação de blocos de colheita. Desta forma, a inclusão de critérios para formação de blocos de colheita dificulta a manutenção do fluxo de produção, uma vez que geralmente há grande variação na área e estoque entre talhões adjacentes.

No cenário (1), com função objetivo de maximização do VPL, se observa a ocorrência de picos de produção nos anos iniciais e no ano 9 do HP. Nos demais cenários este comportamento não é observado. Com a transformação do VPL gerado pela floresta em uma restrição, permitindo uma redução de até 5% e com o critério de formação de blocos, o agendamento foi alterado, se afastando das idades de corte que seriam ideais do ponto de vista econômico. Desta forma, é essencial encontrar um equilíbrio entre a perda do VPL e a formação de blocos, buscando a melhor combinação possível.

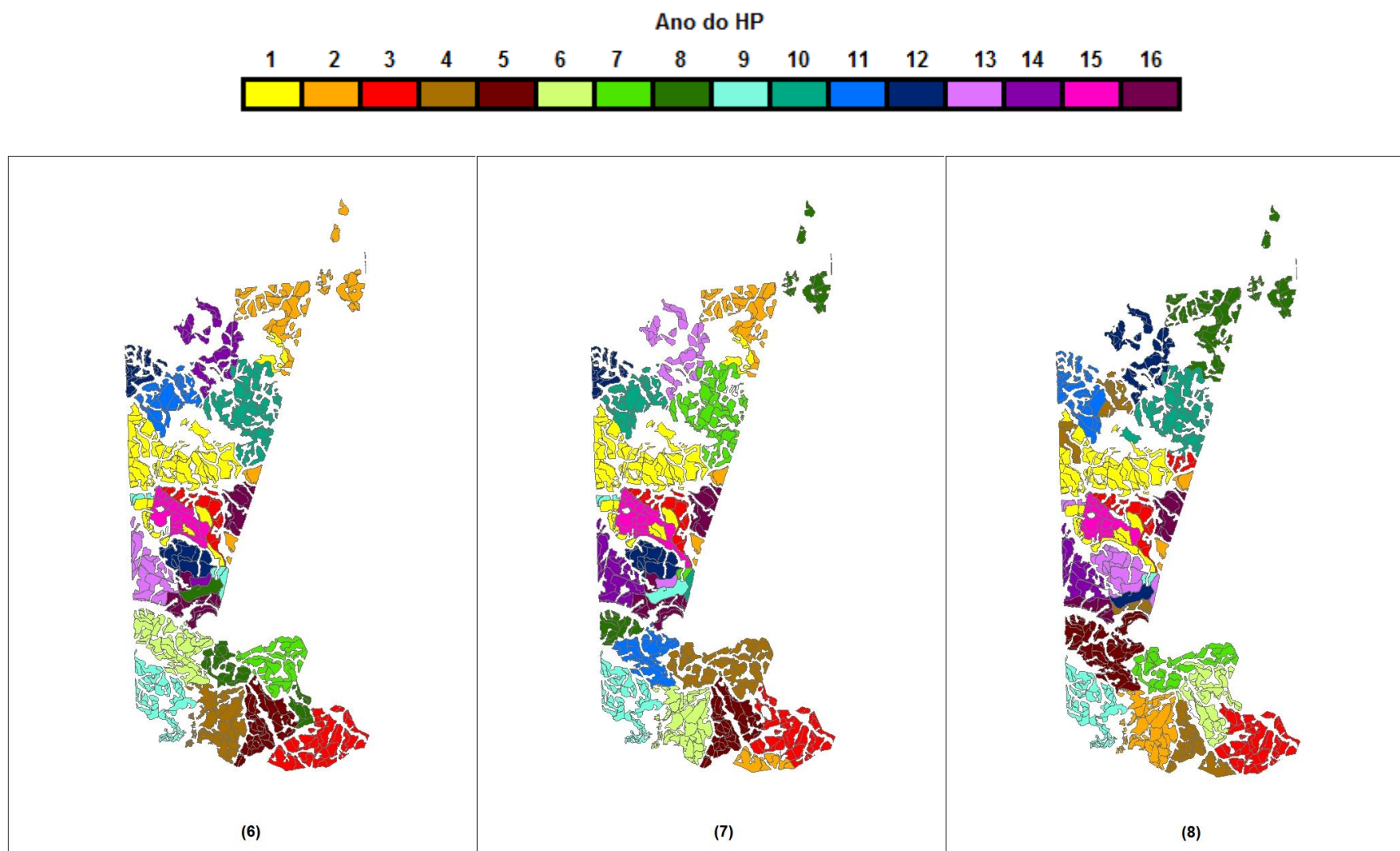


FIGURA 6.3 – CONTINUA...

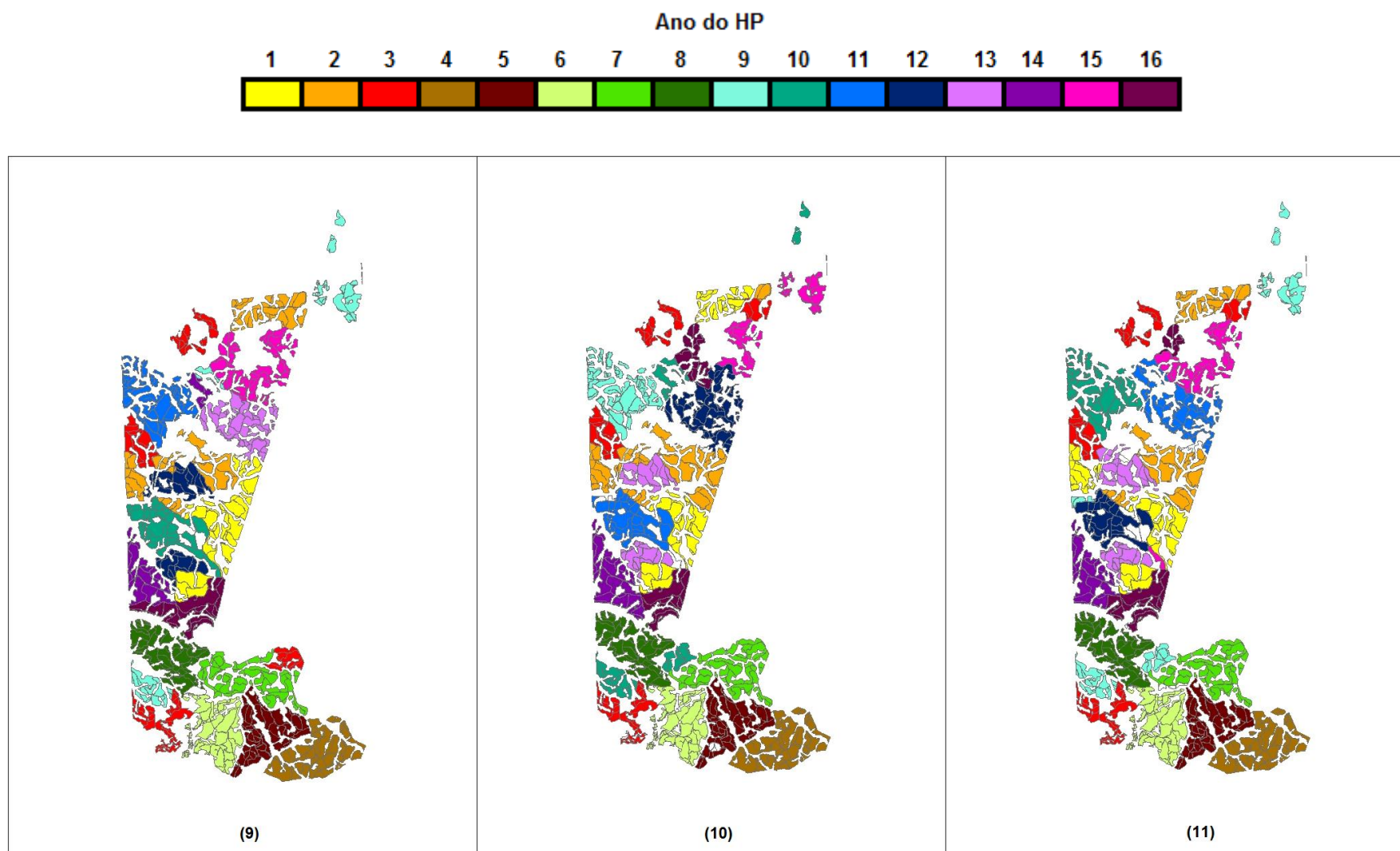


FIGURA 6.3 – AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA PARA OS CENÁRIOS DE *GOAL PROGRAMMING*

É possível observar na FIGURA 6.3 que os cenários em que foi utilizado o modelo multiobjetivo também obteve bons resultados na agregação dos blocos de colheita. Assim como nos cenários (2), (3) e (5) houve a ocorrência de talhões agendados para a colheita sem serem incorporados a nenhum bloco. A formulação multiobjetivo semelhante aos cenários anteriores apenas promove a agregação dos talhões, mas não garante a formação de blocos.

Nos cenários (6), (7) e (8) foram incluídos na função objetivo critérios para a maximização do VPL e minimização do grau residual. Os resultados obtidos no cenário (7), com maior peso para o VPL causou uma maior fragmentação nas áreas de colheita. Este comportamento é esperado, uma vez que a formação de blocos não é a prioridade neste caso. Os cenários (6), com pesos iguais e (8), com prioridade para a minimização do grau residual apresentaram resultados semelhantes. Muitos dos blocos formados no cenário (6) também foram formados no cenário (8), apenas ocorrendo a mudança no ano da colheita. Em ambos cenários ocorreu o agendamento da colheita para talhões isolados.

Considerando os cenários (9), (10) e (11) com objetivo de maximização do VPL e das adjacências entre os talhões foi possível observar resultados semelhantes para os três cenários, com a formação dos mesmos blocos de colheita, alterando-se apenas o ano de corte. A definição de pesos não alterou significativamente as respostas obtidas, no que se refere à configuração espacial dos talhões.

Os cenários com critério para maximização das adjacências (9, 10 e 11), analogamente aos modelos de PLIM testados apresentaram melhores resultados no que se refere à formação de blocos, com menor ocorrência de agendamento da colheita para talhões isolados e pequenos blocos. A formulação considerando a maximização de adjacências representa de maneira mais eficaz a relação espacial entre talhões e trata estas relações mais diretamente, quando comparada à formulação para minimização do grau residual, gerando melhores resultados.

TABELA 6.2 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

CENÁRIO	VOLUME (M³)	VPL (R\$)	VARIAÇÃO (%)	NÚMERO DE RESTRIÇÕES
1	1.605.675,2	80.375.733,73	-	82.742
2	1.562.020,1	76.503.147,39	-4,8	86.519
3	1.574.672,8	76.490.666,43	-4,8	105.783
4	Infactível	-	-	-
5	1.553.281,3	76.369.300,22	-5,0	217.175
6	1.368.410,2	66.221.556,15	-17,6	86.520
7	1.375.674,4	66.812.826,47	-16,9	86.520
8	1.298.586,1	62.710.733,76	-22,0	86.520
9	1.580.753,0	77.848.704,50	-3,1	105.784
10	1.595.066,6	77.919.881,30	-3,1	105.784
11	1.587.186,8	77.548.898,00	-3,5	105.784

Os resultados obtidos pela otimização são demonstrados na TABELA 6.2. Foi possível constatar que os cenários (2) e (3), sem a inclusão das restrições limitando a distância máxima entre talhões em um mesmo ano do horizonte de planejamento obtiveram um melhor resultado para o VPL obtido. A restrição quanto ao limite estabelecido para perda de VPL em 5% foi respeitada, não sendo necessária a utilização de todo o limite estabelecido, para a agregação das áreas de colheita. O cenário (2), para a minimização do grau residual obteve um VPL sensivelmente maior, porém a agregação das áreas de colheita foi mais satisfatória no cenário (3). No cenário (5) foi necessária a utilização de toda a margem de redução de VPL permitida. A resposta obtida pelo modelo (5) no que se refere à distribuição espacial da colheita foi a mais satisfatória entre os cenários de PLIM. Porém em situações em que a floresta apresente um grande número de talhões, esta restrição pode inviabilizar a solução do modelo em tempos razoáveis de

processamento, em virtude da inclusão de um número proporcional ao dobro do número de talhões a cada ano do HP.

Considerando os cenários 6 a 11, com a aplicação da abordagem multiobjetivo, foi constatado que a inclusão do critério de minimização do grau residual causou uma significativa redução no VPL obtido para as três combinações de peso. O cenário em que o VPL possuía maior peso, como esperado, apresentou o maior VPL, porém ainda com uma redução de 16,9% quando comparado ao VPL obtido no cenário 1. No cenário 8, com maior peso para a minimização do grau residual a redução no VPL chegou a 22%. Em face destes resultados, se faz necessária a designação de pesos maiores para o VPL, com o objetivo de obter soluções aceitáveis.

Os cenários 9 a 11, com maximização das adjacências, apresentaram respostas de boa qualidade para as três combinações de pesos. A aplicação do peso maior para o VPL aumentou sensivelmente o resultado, comparado ao cenário (9), em que pesos iguais foram utilizados. A utilização de maior peso para a maximização das adjacências causou um maior efeito, reduzindo em 3,5% o VPL com relação ao cenário (1). Os três cenários apresentaram formação de blocos satisfatória, portanto o cenário (10) com obtenção do maior VPL se apresentou o mais adequado

Considerando que nos cenários (9) a (11), com modelagem de GP foi possível obter a formação de blocos de colheita, com uma redução do VPL na ordem de 3% apenas, é possível tornar a restrição ligada ao VPL nos modelos de PLIM mais restritiva, permitindo uma menor redução no VPL. Comparando-se os cenários de PLIM com os cenários de GP (9 a 11) se observou que as respostas obtidas pelos modelos de GP foram mais satisfatórias.

Öhman E Eriksson (2010) obtiveram resultados semelhantes estudando um problema de agregação espacial da colheita em uma floresta composta por talhões. Os autores aplicaram um modelo multiobjetivo incluindo o VPL e a minimização do perímetro das áreas de colheita na função objetivo. Segundo os autores foi possível

obter a agregação das áreas de colheita com uma redução moderada no VPL, na ordem de 2,6 %.

Tóth (2005) estudou um problema de otimização multiobjectivo, buscando maximizar o VPL da floresta e a área mínima de floresta madura ao longo do HP para promover habitat para a fauna. A formação áreas de floresta madura causou impactos variando de 0,7 a 11,2%. Öhman e Lamas (2003) aplicaram um modelo multiobjectivo para maximizar o VPL da floresta e agregar as atividades de colheita através de uma variável denominada de volume efetivo. Os autores aplicaram o modelo a uma floresta de 2643 talhões e obtiveram reduções no VPL de 6,6% quando um maior peso foi designado à agregação das áreas de colheita.

Para a formação dos blocos de colheita durante todo o horizonte de planejamento se fez necessária a flexibilização tanto dos regimes de manejo como no fluxo de produção. Com a heterogeneidade de áreas e estoque entre talhões contíguos, a formação de blocos se torna restritiva, podendo ser necessária a colheita de talhões em idades não usuais em regimes tradicionais. Consequentemente o mix de sortimentos e produtos obtidos na colheita quando incluídos critérios espaciais é alterado, quando comparado aos cenários sem este tipo de consideração. Segundo Ohman & Eriksson (2010) outro efeito da agregação das áreas de colheita é a redução na aplicação de desbastes na floresta. Isto decorre do fato de aplicação cada vez mais de colheita na forma de corte raso, uma vez que com a agregação das áreas de colheita é possível retirar um maior volume de áreas de colheita menores.

As formulações apresentadas, apesar de não garantirem a adjacência das áreas de colheita apresentaram respostas de boa qualidade, se mostrando uma alternativa viável para a inclusão de questões operacionais ligadas à colheita florestal. As formulações apresentadas se mostraram modelos flexíveis e viáveis para a aplicação ao longo de todo o horizonte de planejamento. Em casos de formulações que garantem a formação dos blocos de colheita a aplicação em todos os anos do horizonte de planejamento acarreta em um grande aumento no número

de restrições do modelo, se tornando inviável a resolução em intervalos de tempo aceitáveis.

6.4 CONCLUSÕES

As formulações apresentadas apresentam potencial para a inclusão de questões operacionais no planejamento da colheita florestal, sendo possível obter uma distribuição espacial satisfatória de talhões, com reduções razoáveis ao VPL obtido.

Os modelos de *Goal Programming* com maximização de adjacências apresentam as melhores respostas, considerando a agregação das atividades de colheita e VPL obtido. Considerando que a resposta obtida através destes modelos pode apresentar grande variação dependendo dos pesos determinados para cada componente da função objetivo, e ainda considerando a subjetividade nesta tarefa é recomendável uma busca exaustiva de combinações e a realização de análise de sensibilidade buscando a melhor resposta possível de acordo com os objetivos.

O modelo de *Goal Programming* com a maximização de adjacências e maior peso para o VPL é o mais adequado ao caso estudado, considerando a resposta satisfatória na formação de blocos e uma redução de apenas 3,1% ao VPL.

A aplicação da restrição limitando a distância máxima entre os talhões colhidos, em um mesmo ano do horizonte de planejamento, leva a uma resposta satisfatória com relação ao agendamento da colheita, porém se mostra custosa ao processamento do modelo, em virtude da introdução de um número de restrições proporcional ao quadrado do número de talhões a cada ano do horizonte de planejamento.

Para a avaliação da viabilidade de agregação dos blocos de colheita é necessária uma visão holística dos processos envolvidos e não somente a consideração apenas da movimentação das máquinas de colheita e VPL obtido. A redução dos custos relacionados à construção e manutenção de estradas e alterações no sortimento e fluxo de madeira obtidos pode ser determinante no

processo de tomada de decisão, no que se refere à agregação dos blocos de colheita.

6.5 BIBLIOGRAFIA

BAZARAA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. **Linear Programming and Network Flows**. John Wiley & Sons, 2010, 748 páginas.

BROWN, K. N.; PROSSER P.; BECK, J. C.; WU, C. W. **Exploring the use of constraint programming for enforcing connectivity during graph generation**. The Fifth Workshop on Modelling and Solving Problems with Constraints, Edindurgh, 2005.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, K.J. **Decision methods for forest resources management**. Academic Press, 2003. 439p.

GUSTAFSON, E. J. **Clustering Timber Harvests and the Effect of Dynamic Forest Management Policy on Forest Fragmentation**. Ecosystems (1998): 484-492.

LI, R.; BETTINGER, P.; BOSTON, K. **Informed Development of Meta Heuristics for Spatial Forest Planning Problems**. The Open Operational Research Journal, 2010, 4, 1-11.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. **Aggregating Harvest Activities in Long Term Forest Planning by Minimizing Harvest Area Perimeters**. Silva Fennica 44, Volume 1, p 77-89, 2010.

ÖHMAN, K. LÄMAS, T. **A Model for Clustering of Harvest Activities in Long Term Forest Planning**. INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION; 4; 1701-1706, 2001.

ÖHMAN, K. LÄMAS, T. **Clustering of harvest activities in multi-objective long-term forest planning**. Forest Ecology and Management 176 (2003) 161-171.

SEDGEWICK, R.; WAYNE, K. **Algorithms**, 4th Edition. Princeton University. Pearson Education, 2011, 955p.

SMALTSCHINSKI, T.; SEELING, U.; BECKER, G. **Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimized harvest scheduling**. Annals of Forest Science (2012) 69:651–657.

TÓTH, S. F. **Modeling timber and non-timber trade-offs in spatially-explicit forest planning**. Tese de doutorado, The Pennsylvania State University, 2005.

7 PROMOVENDO A CONECTIVIDADE DAS ÁREAS DE COLHEITA EM PROBLEMAS DE AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL

RESUMO

Problemas envolvendo a conectividade de grafos são frequentes em diversos problemas clássicos de otimização e aplicações práticas, tais como o roteamento de veículos e a construção de redes de energia. Na área florestal são encontrados exemplos de aplicação de problemas de grafos principalmente em modelos para a criação de corredores ecológicos e reservas para a fauna. Problemas de conectividade também estão presentes no agendamento da colheita florestal, com o objetivo de redução de custos da colheita. Neste contexto, um modelo baseado no problema de arborescência mínima foi aplicado a um modelo de planejamento florestal de longo prazo, a fim de obter a conectividade das áreas de colheita nos primeiros 5 anos do horizonte de planejamento. Foi avaliado o impacto destas restrições de conectividade sobre o arranjo espacial dos talhões selecionados para a colheita, bem como sobre o VPL advindo da floresta. Para a formulação foi aplicada uma relação do problema de arborescência mínima generalizada denominada RP cycle. A inclusão das restrições de conectividade ao modelo de otimização foi capaz de agregar os talhões agendados para a colheita, porém não foi possível obter a conectividade total das áreas de colheita, devido à ocorrência de ciclos na resposta. A escolha de raízes para a formulação das restrições de conectividade, demandada pela relaxação aplicada teve efeito significativo sobre a complexidade do modelo de otimização, bem como sobre a qualidade da resposta obtida. Os tempos de processamento e efeito sobre o VPL foram aceitáveis para a maioria dos cenários testados.

Palavras chave: planejamento florestal; conectividade; arborescência mínima

ABSTRACT

Problems related to the connectivity of graphs are frequent in several classical optimization problems and practical applications, such as the vehicle routing and power network construction. In the forestry area, applications for graph problems are found mainly in models for wildlife habitat patches and habitat reserves creation. Problems related to connectivity are also present in the forest harvest scheduling, aiming for reducing the harvesting costs. In this sense, a model based on the minimum spanning tree problem was applied to a long-term forest planning model, in order to obtain the connectivity of the harvesting areas in the first 5 years of the planning horizon. The impact of the connectivity constraints on the spatial distribution of the stands to be harvested and the NPV of the forest was assessed. For the model formulation a relaxation of the generalized minimum spanning tree, named RP cycle was applied. The inclusion of connectivity constraints in the optimization model was capable to aggregate the stands scheduled for the harvesting, however it was not possible to obtain the total connectivity of the harvesting areas, due to the occurrence of cycles in the results. The choosing of the roots for the connectivity constraints, demanded by the relaxation RP cycle, had significant impact on the complexity and quality of the results. The processing time and effect on the NPV of the forest were acceptable for most part of the cases tested.

Key words: forest planning; connectivity; minimum spanning tree

7.1 INTRODUÇÃO

Questões envolvendo conectividade ocupam um papel de destaque em diversos problemas de pesquisa operacional, principalmente no que se refere a problemas de otimização de grafos. Diversos problemas clássicos como o problema do caixeiro viajante, o problema do carteiro chinês e arborescência mínima envolvem a obtenção de grafos conectados e possuem uma série de aplicações como o roteamento de veículos, construção de redes de energia, projetos de rotas aéreas, entre outras.

Além das aplicações citadas anteriormente, problemas envolvendo grafos vêm ganhando destaque na área florestal em questões de planejamento espacial de habitats para a fauna e em problemas logísticos. Os problemas de criação de habitat para fauna geralmente envolvem a formação de áreas contínuas de floresta madura e corredores ecológicos, sendo necessária desta forma a obtenção da conectividade de tais áreas ao longo do horizonte de planejamento. No âmbito dos problemas logísticos podem ser citados o fluxo de transporte de produtos florestais e problemas envolvendo o agendamento espacial da colheita, buscando a conectividade de áreas de colheita em um mesmo ano do horizonte de planejamento.

Dilkina e Gomes (2010) estudaram formulações baseadas em problemas de subgrafo conectado com objetivo de formar áreas a serem destinadas para conservação da fauna de forma a garantir a manutenção das diversas espécies em determinadas áreas. Para tal, os autores exploram diversas formulações de problemas de grafos, incluindo o problema de fluxo máximo de produto único, problema de fluxo máximo de multiprodutos e árvores Steiner em uma área composta por 100 parcelas. Önal e Briers (2006) aplicaram um modelo baseado em um problema de arborescência mínima para a criação de conectividade entre reservas de habitat para pássaros, criando corredores ecológicos. Lai et al. (2011) aplicaram um modelo de otimização baseado em um problema de multigrafo Steiner em diferentes instâncias hipotéticas para criação de corredores ecológicos para

múltiplas espécies com custo mínimo. Os autores obtiveram resultados satisfatórios aplicando métodos exatos e heurísticos para a resolução dos modelos.

Através da agregação das áreas de colheita florestal é possível aumentar a eficiência desta operação, devido à menor movimentação das máquinas entre as frentes de colheita, reduzindo o número de horas improdutivas. Adicionalmente, o custo de manutenção e construção de estradas é reduzido, uma vez que a produção de um grande número de talhões pode ser escoada por uma mesma estrada. Neste sentido, Smaltchinski et al. (2012) aplicaram uma análise de cluster para agregação dos talhões selecionados para a colheita, aplicando o algoritmo de caminho mínimo de Dijkstra para seleção dos talhões.

Neste contexto, o objetivo do presente estudo foi o de incluir critérios para a obtenção de conectividade das áreas de colheita florestal em um mesmo ano do HP através de um modelo baseado em formulações para resolução de problemas de arborescência mínima, avaliando a efetividade das restrições para promover a conectividade da colheita, bem como o impacto destas restrições sobre a produção física e econômica da floresta.

7.2 MATERIAIS E MÉTODOS

7.2.1 Área de estudo

Como área de estudo foi utilizada uma floresta de *Pinus spp* e *Eucalyptus spp*, localizada nos municípios de Bituruna e General Carneiro, Paraná, entre as coordenadas 26°13'58,31" e 26°22'5,634" S e 51°34'14,6 e 51°30'26,14" W. O clima segundo Köppen é classificado como Cfb: sub-tropical úmido mesotérmico, com verões frescos e invernos com ocorrências de geadas severas e frequentes.

A área é composta por 236 talhões, sendo 18 talhões da espécie *Eucalyptus spp*, 21 talhões de *Pinus spp* e 197 talhões de *Pinus taeda*, com uma área total de

2365,8 hectares. A área média dos talhões é de 10,3 ha e o número médio de adjacências por talhão é igual a 3.

7.2.2 Modelo de otimização

Considerando um grafo $G = (V, E)$, definido por um conjunto de vértices $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ e um conjunto de arestas $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ligando pares de vértices. Assumindo ainda para cada aresta $(u, v) \in E$ um peso $w(u, v)$ especificando o custo para ligar os vértices u e v . O problema da arborescência mínima, demonstrado na FIGURA 7.1, consiste em encontrar um subgrafo acíclico $T \subseteq E$ que conecta todos os vértices e cujo custo total é minimizado. Tendo em vista que T é acíclico e conecta todos os vértices, este subconjunto deve formar uma árvore (CORMEN et al., 2009).

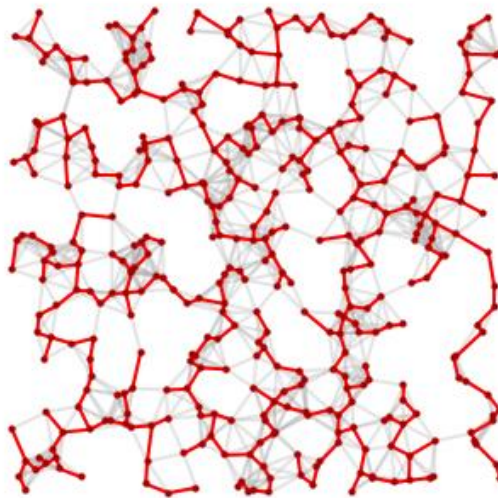


FIGURA 7.1 – EXEMPLO DE ARBORESCÊNCIA MÍNIMA

Fonte: mathematica.stackexchange.com

O problema da arborescência mínima (FIGURA 7.1) é uma modelagem natural para uma série de aplicações práticas. Como exemplo pode ser citado a construção de circuitos eletrônicos e redes de telecomunicações, onde as arestas

podem representar fios e o peso pode representar o comprimento destes fios, seu custo ou o tempo necessário para que um sinal se propague através dele. Em mapas de rotas aéreas as arestas podem representar as rotas e os pesos podem representar distâncias ou taxas (SEGEWICK & WAYNE, 2011). Ainda podem ser encontradas aplicações na construção de redes de computadores, redes de energia, redes de transporte, além de oferecer, indiretamente métodos de solução para outros problemas. Entre estes podemos citar testes de homogeneidade de superfície, processamento de imagem, problemas de agregação e classificação, entre outros (GRAHAM e HELL, 1985).

Existem algoritmos que resolvem o problema da arborescência mínima tradicional em tempo polinomial, notadamente o algoritmo de Prim e o algoritmo de Kruskal. Entretanto quando são introduzidas restrições adicionais esses algoritmos não são aplicáveis e cresce consideravelmente a complexidade do problema.

Uma alternativa para a resolução destes problemas com restrições adicionais é a formulação como um modelo de programação linear inteira. Na literatura é possível encontrar uma série de exemplos destas formulações. Pop (2002) usou um modelo de programação inteira para resolver um problema de arborescência mínima generalizada, onde no lugar de vértices existe um grupo de vértices e devem ser escolhidas arestas entre vértices de grupos diferentes, até que seja formada uma árvore de custo mínimo. Gouveia et al. (2011) aplicaram modelos de PLI para resolver o problema de arborescência mínima com restrição de diâmetro e com restrição de salto, onde se deseja achar uma arborescência mínima, de modo que a distância entre dois vértices do grafo não seja superior a um limite estabelecido. Noronha et al. (2010) também apresenta modelos de PLI para formulação do problema de arborescência mínima com restrição de diâmetro.

Para formular um problema de arborescência mínima como um modelo de PLI é necessária a introdução das seguintes variáveis de decisão:

$$x_e \begin{cases} 1 & \text{caso a aresta e seja incluída na solução} \\ 0 & \text{caso a aresta e não seja incluída na solução} \end{cases}$$

c_e { custo para incluir a aresta e na solução

Para um conjunto $S \subseteq V$, se define $E(S)$ como o conjunto de arestas em que ambos os vértices que são ligados estão contidos em S . Para que seja formada uma arborescência mínima existem no máximo $|S| - 1$ arestas contidas em $E(S)$, onde $|S|$ denota o número de vértices em S . Desta forma o problema pode ser expresso como segue:

Minimizar

$$\sum_{e \in E} c_e x_e \quad (7.1)$$

Sujeito a

$$\sum_{e \in E(S)} x_e \leq |S| - 1 \quad S \neq \emptyset, S \subset V \quad (7.2)$$

$$\sum_{e \in E} x_e = |V| - 1 \quad (7.3)$$

$$x_e \in \{0, 1\} \quad \forall e \in E \quad (7.4)$$

Adaptado de RAVI (2009).

A função objetivo (7.1) é dada pela minimização da soma do produto dos custos de cada aresta pela variável binária de decisão. Assim caso uma aresta seja selecionada para fazer parte da solução, o seu custo correspondente é adicionado à soma. A restrição (7.3) é introduzida para garantir que o número de arestas na solução seja igual ao número de vértices menos 1. Com isso, na ausência de ciclos, é garantida a formação de uma árvore ligando todos os vértices. A restrição (7.4) é a restrição de não negatividade das variáveis de decisão. A restrição (7.2) é um conjunto de restrições conhecido como restrições de eliminação de subrota. Estas restrições, também conhecidas como DFJ, foram introduzidas inicialmente por

Dantzig, Fulkerson e Johnson em 1954 para a resolução do problema do caixeiro viajante.

As restrições DFJ visam evitar que conjuntos de arestas que formem ciclos sejam inseridos na solução, criando subconjuntos de vértices desconectados. Entretanto essa formulação insere um número de restrições que cresce exponencialmente com o número de vértices do grafo. Como alternativa a este entrave, as inequações de subrotas podem ser geradas à medida que vão sendo necessárias, até que um ciclo hamiltoniano seja obtido. Esta técnica foi proposta por Dantzig, Fulkerson e Johnson em 1954 para resolver com sucesso um problema com 49 cidades (FENATO, 2008).

Tendo em vista a dificuldade na resolução destes problemas de otimização combinatória, envolvendo grafos com grande número de vértices, em face do grande número de restrições envolvido para a eliminação de ciclos, foram propostas formulações mais compactas, que permitiram a formulação do problema de arborescência mínima através de um número polinomial de restrições.

Muitos problemas de otimização combinatória demandam a otimização de uma função linear $c'x$ sobre um conjunto discreto S de vetores solução. O envoltório convexo destes vetores solução é geralmente denominado polítopo. Otimizar uma função linear sobre um polítopo é um problema de programação linear. Tipicamente os polítopos de problemas combinatórios possuem um número exponencial de faces. Entretanto em alguns casos o tamanho do problema pode ser reduzido drasticamente com a utilização de variáveis e restrições extras (YANNAKAKIS, 1991). Segundo o mesmo autor o problema da arborescência mínima possui um polítopo, proposto por Martin (1991), que permite sua formulação com um número polinomial de restrições. Nesta formulação o problema de arborescência mínima é transformado em um problema direcionado. Para tal, cada aresta e ligando os vértices i e j presente no grafo é substituída por um par de arcos (i, j) e (j, i) , que possuem o mesmo peso. O polítopo proposto por Martin pode ser formulado através do seguinte modelo de programação linear inteira:

$$\sum_{(i,j)} x_{ij} = n - 1 \quad (7.5)$$

$$\lambda_{kij} + \lambda_{kji} = x_{ij} \quad \text{para } 1 \leq k, i, j \leq n \text{ e } i \neq j \quad (7.6)$$

$$\sum_j \lambda_{kij} = 1 \quad \text{para } 1 \leq k, i, j \leq n \text{ e } i \neq k \quad (7.7)$$

$$\lambda_{kkj} = 0 \quad \text{para } 1 \leq k, j \leq n \quad (7.8)$$

$$x_{ij}, \lambda_{kij} \in \{0, 1\} \quad \text{para } 1 \leq k, i, j \leq n \quad (7.9)$$

(Adaptado de Pop, 2002).

Onde n representa o número de vértices e x_{ij} é a variável binária de decisão que toma valor 1 caso a aresta ligando os vértices i e j seja incluída na resposta ou valor 0 caso contrário.

As variáveis λ_{kij} são definidas para cada conjunto de 3 vértices k, i, j , com $i \neq j \neq k$ e seu valor para uma arborescência mínima é:

$$\lambda_{kij} = \begin{cases} 1 & \text{se } j \text{ é vértice pai de } i \text{ quando a raiz da árvore é } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A restrição (7.6) impõe que um arco (i, j) faz parte da solução se, e somente se, i é pai de j ou j é pai de i ; a restrição (7.7) significa que se o vértice k é escolhido como raiz, então todos os outros vértices, exceto k , possuem pais e a restrição (7.8) significa que a raiz k não possui vértices pais (Pop, 2002). Neste caso as restrições de eliminação de subrota (7.2) são substituídas pelo conjunto de restrições (7.6) – (7.8).

A partir destes conceitos é possível estabelecer uma relação entre o problema da arborescência mínima e o problema da agregação dos talhões na colheita florestal. Considerando os talhões de uma floresta como o conjunto de vértices de um grafo e as vizinhanças entre estes talhões como o conjunto de arestas, é possível aplicar os modelos de programação inteira de problemas de arborescência mínima a um modelo de planejamento florestal otimizado. Com isso, se busca obter conectividade entre as áreas selecionadas para um corte raso em determinado ano do horizonte de planejamento.

Para a formulação deste modelo são necessárias algumas considerações. Primeiramente, como as funções objetivo não estarão relacionadas a distâncias, ou custos das arestas, mas sim relacionadas ao Valor Presente Líquido e ao volume gerado durante o horizonte de planejamento, não é necessária a determinação de pesos para as arestas. Desta forma, qualquer solução em que os talhões colhidos e suas respectivas arestas de ligação formem uma árvore é considerada factível. Também deve ser determinado o conjunto de arestas que podem fazer parte da solução. Tradicionalmente, em problemas de arborescência mínima são utilizados grafos completos, ou seja, todos os vértices são adjacentes entre si. Entretanto isto não ocorre em uma área florestal. Como os vértices representam talhões, devem ser consideradas factíveis apenas arestas entre talhões adjacentes. A inclusão de arestas ligando talhões não adjacentes na solução pode causar a fragmentação da área de colheita, pois neste cenário, mesmo respeitadas as restrições de conectividade, seriam permitidos cortes de talhões não adjacentes.

Assim, aplicando a formulação de arborescência mínima proposta por Martin em um modelo de planejamento florestal, tem-se que:

Maximizar

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{HP} c_{ij} x_{ij} \quad (7.10)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^{HP} x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (7.11)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq 0.85 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (7.12)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq 1.15 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1} \quad j = 2 \dots HP \quad (7.13)$$

$$\sum_{(i,k) \in \delta(E)} y_{ikj} = \sum_i x_{ij} - 1 \quad j = 1 \dots 5 \quad (7.14)$$

$$y_{ikj} + y_{kji} \geq x_{ij} \quad \forall i, \forall k, j = 1 \dots 5 \quad (7.15)$$

$$x_{ij} \geq y_{ikj}, x_{kj} \geq y_{ikj} \quad \forall (i, k) \in \delta(E), j = 1 \dots 5 \quad (7.16)$$

$$\lambda_{kizj} + \lambda_{kzij} = y_{izj} \quad \text{com } 1 \leq k, i, z \leq n \text{ e } i \neq z, j = 1 \dots 5 \quad (7.17)$$

$$\sum_z \lambda_{kizj} = 1 \quad \text{com } 1 \leq k, i, z \leq n \text{ e } i \neq k, j = 1 \dots 5 \quad (7.18)$$

$$\lambda_{kkij} = 0 \quad \forall j, \forall k, \forall i \quad (7.19)$$

$$x_{ij}, y_{ikj}, \lambda_{kizj} \in \{0, 1\} \quad \forall j, \forall k, \forall i, \forall z \quad (7.20)$$

Onde:

N : Número de talhões da floresta

HP : Número de anos do horizonte de planejamento

- x_{ij} : variável binária que assume valor 1 caso o talhão i seja submetido ao regime de manejo j ou valor 0 caso contrário
- c_{ij} : Valor Presente Líquido gerado pelo talhão i quando colhido no ano j
- v_{ij} : volume gerado pelo talhão i quando colhido no ano j
- y_{ikj} : variável binária que assume valor 1 caso a aresta que liga os talhões i e k seja selecionado para fazer parte da solução no ano j ou valor 0 caso contrário.
- $\delta(E)$: conjunto de arestas que ligam talhões adjacentes
- λ_{kizj} : variável binária que assume valor 1 se o talhão z é pai de i quando a raiz da arborescência mínima é o talhão k no ano j ou valor 0 caso contrário.

As funções (7.10) representa as funções objetivo do modelo, com objetivo de representa a maximização do VPL da floresta.

A restrição (7.11) impõe seja aplicado apenas um regime de manejo para cada talhão, ao longo do HP. As restrições (7.12) e (7.13) são as restrições de equilíbrio, que impõe que a cada ano o volume produzido se encontre entre os limites inferior e superior, evitando grandes flutuações na produção da floresta.

As restrições (7.14) - (7.19) são as restrições que representam a arborescência mínima. A restrição (7.14) impõe que a cada ano o número de arcos na solução seja igual ao número de talhões colhidos menos um. Com isso se garante que todos os talhões estejam conectados. A restrição (7.15) visa garantir que cada talhão selecionado para o corte raso a cada ano, esteja ligado a pelo menos um arco. A restrição (7.16) garante que se uma aresta é selecionada para fazer parte da solução em determinado ano do horizonte de planejamento, os talhões correspondentes sejam colhidos no mesmo ano.

As restrições (7.17) - (7.19) visam evitar que não ocorram ciclos na solução, garantindo desta forma a conectividade dos talhões selecionados para o corte raso em um determinado ano do horizonte de planejamento.

Mesmo utilizando uma formulação do problema com um número polinomial de restrições, a resolução por métodos exatos ainda se apresenta uma tarefa difícil. Comumente uma área florestal possui um grande número de talhões, isto implica em um problema com grande número de vértices e consequentemente, um grande número de restrições e de variáveis extra (proporcional ao cubo do número de talhões presentes na área).

Tendo em vista o exposto, para a resolução do modelo em questão foi aplicada a relaxação proposta por Pop (2002), denominada *rooting procedure*. O autor aplicou esta relaxação em um problema de arborescência mínima generalizada. Esta técnica consiste em escolher aleatoriamente um vértice k e torná-lo a raiz da árvore global, ou seja, tornar o valor de k fixo nas restrições (17) - (19). Caso a solução obtida forme uma árvore, tem-se a resposta para o problema da arborescência mínima. Caso contrário é escolhida uma outra raiz ou adicionada uma segunda raiz até que se obtenha uma resposta satisfatória (POP, 2002).

GOLDEN et al. (2008) também estudando um problema de arborescência mínima generalizada propõe estratégias para a inclusão ou substituição de raízes nesta relaxação. Observando que Pop (2004) não estabelece estratégias para a inclusão ou substituição de raízes na relaxação, propõe alguns procedimentos para a realização destas tarefas. Os autores obtiveram bons resultados computacionais em uma variante da relaxação *rooting procedure*, que denominaram de RP_{cycle} . Esta variante consiste em examinar a resposta obtida pela *rooting procedure*, identificar a existência de ciclos e apenas incluir raízes que façam parte destes ciclos. Os passos para implementação desta relaxação são demonstrados no QUADRO 7.1, a seguir:

Passo 0	$W = \emptyset$
Passo 1	Escolher aleatoriamente um vértice $r \notin W$
Passo 2	$W = W \cup \{r\}$ Adicionar todas as variáveis e restrições da formulação para $k = r$ e resolver a relaxação
Passo 3	Verificar se a solução é uma árvore generalizada Se sim Término, solução encontrada Se não Ir ao passo 4
Passo 4	Identificar um vértice presente em um ciclo na solução obtida $r = \text{vértice identificado no passo anterior}$ Ir ao passo 2

QUADRO 7.1 - RELAXAÇÃO RP_{cycle}

(GOLDEN et al., 2008).

Para a resolução do modelo de planejamento florestal proposto foi utilizada a relaxação RP_{cycle} . Inicialmente foi resolvido o problema de planejamento livre, ou seja, sem as restrições (14) – (19), em seguida foi verificado a cada ano, as áreas onde os talhões possuíam maior agregação. Foi determinado arbitrariamente um destes talhões a cada ano, escolhidos como raízes para a relaxação. A partir destes talhões determinados como raízes, a cada ano foram criadas as restrições de eliminação de ciclos (17) – (19), com o valor de k fixo, referente ao talhão escolhido como raiz. O modelo foi resolvido, e nos casos onde ocorreram ciclos, foi aplicado o procedimento correspondente à relaxação RP_{cycle} .

O horizonte de planejamento adotado foi de 16 anos, em regimes de manejo sem desbaste. Para a restrição de equilíbrio da produção foi permitida uma variação de 15% para mais ou para menos em relação ao volume obtido no primeiro ano do

HP. Foram testados cenários com e sem restrições de equilíbrio e com e sem restrições de conectividade. Para as restrições de conectividade, inicialmente foram realizados testes com uma raiz por ano e em seguida com raízes adicionais para a eliminação de ciclos, gerando 6 cenários (TABELA 7.1). As raízes presentes na tabela 7.1 representam as raízes nos primeiros 5 anos, consecutivamente. Nos cenários 4 e 5 foram aplicadas raízes adicionais nos anos 3 e 5 do HP.

TABELA 7.1 – CÉNARIOS TESTADOS

Cenário	Restrições
1	Equilíbrio
2	Raízes: 159 – 173 – 9 – 179 - 24
3	Raízes: 148 – 163 – 226 – 191 - 20
4	Raízes: 151 – 164 – 188 – 174 - 180
5	Raízes: 151 – 164 – 188, 34 – 174 – 180, 23
6	Raízes: 159 – 173 – 9, 188 – 179 – 24, 23

7.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os cenários de planejamento foram gerados por meio do software Optimber-LP e em seguida os modelos de otimização foram resolvidos através do software Gurobi 5.5 em computador com processador Intel® Core™ Duo CPU 2,93 GHz e 4Mb de memória RAM. Foram estabelecidos dois critérios de parada para a otimização: 1- gap entre a resposta obtida e o ótimo relaxado inferior a 3% ou 2- tempo de processamento de 4 horas. Os resultados obtidos são demonstrados a seguir:

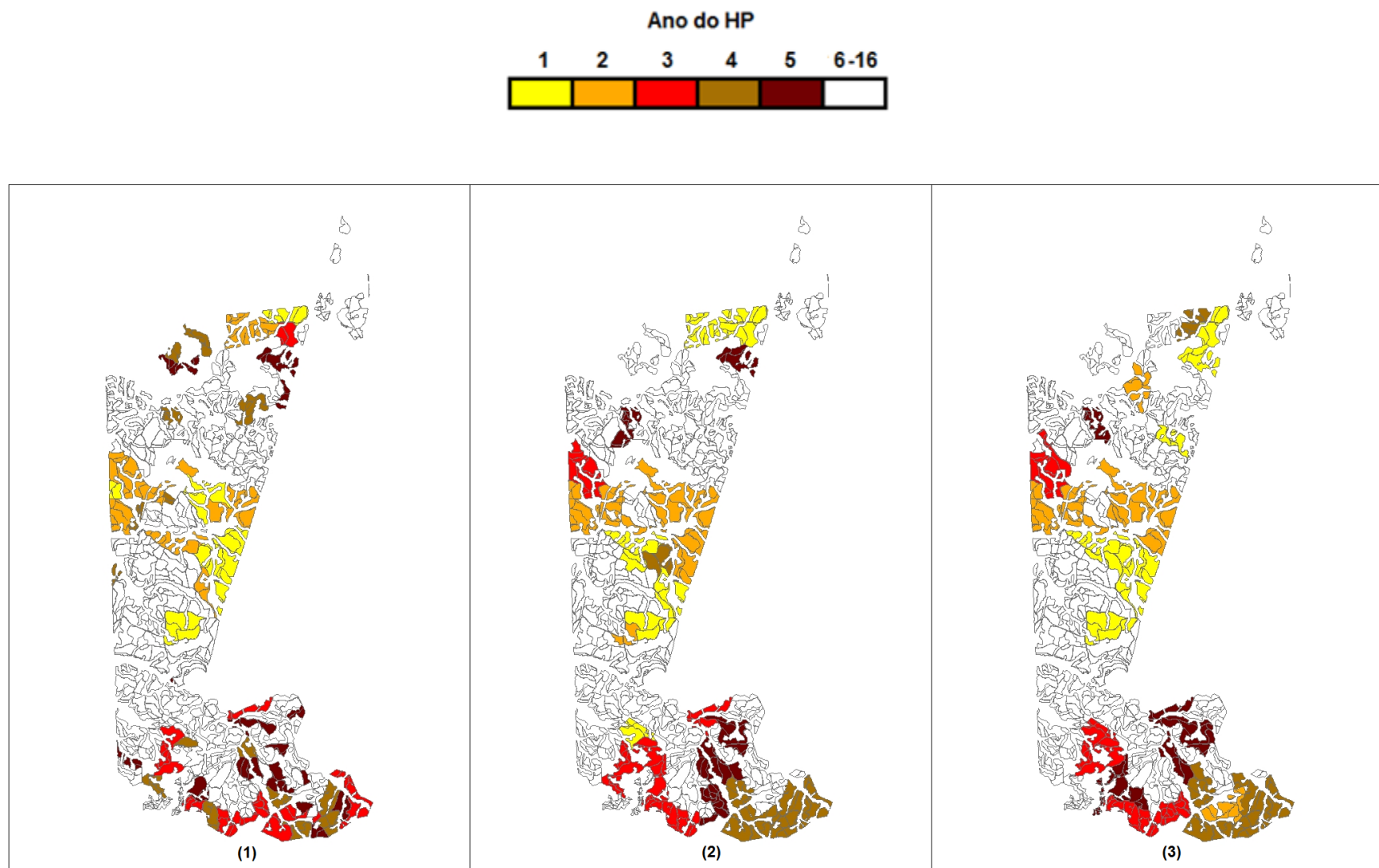


FIGURA 7.2 - CONTINUA...

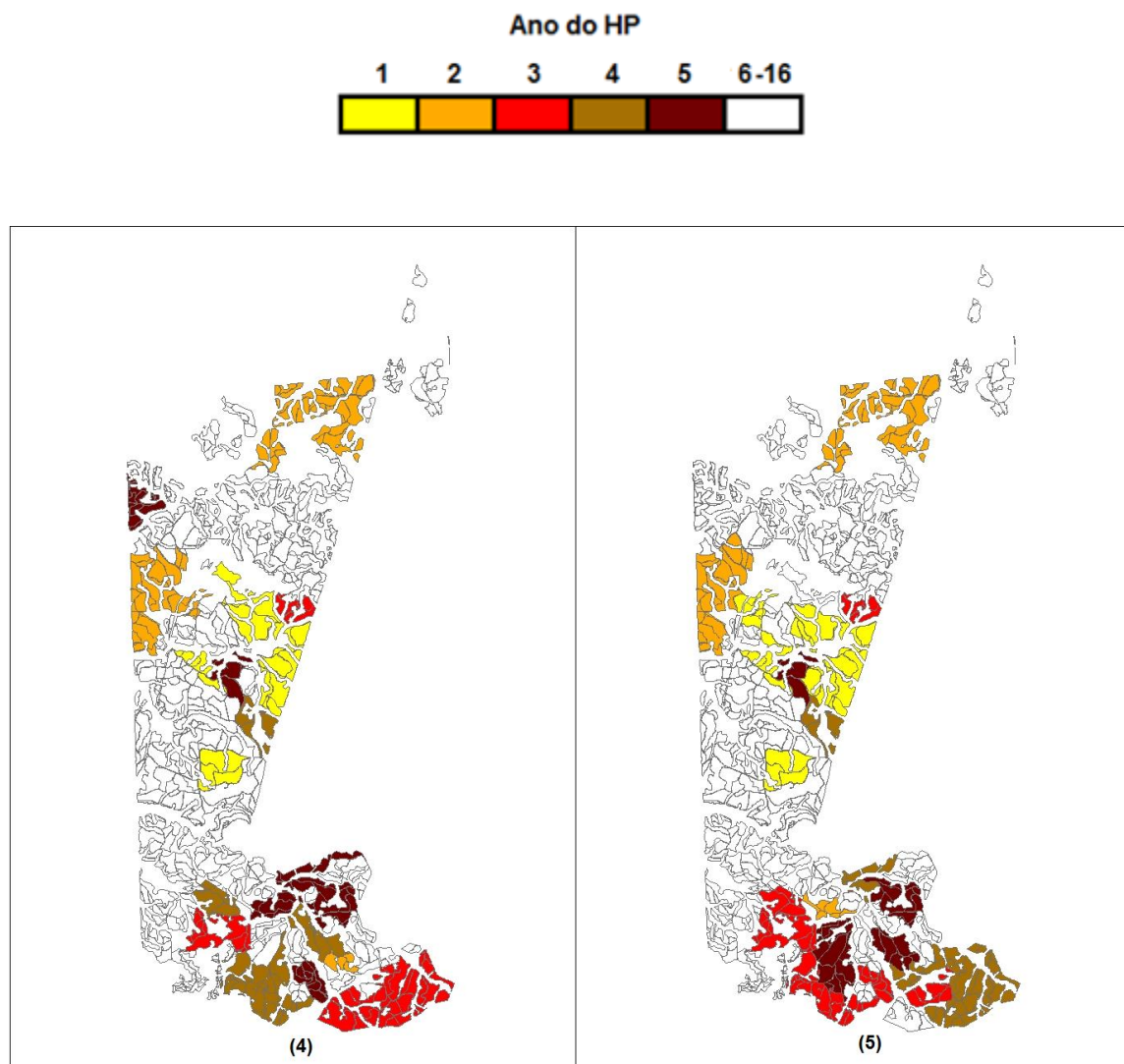


FIGURA 7.2 – AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA

Na FIGURA 7.2 é possível observar a configuração espacial dos talhões a serem colhidos nos primeiros 5 anos do horizonte de planejamento resultantes do processo de otimização. Houve de maneira geral agregação dos talhões agendados para a colheita para o período em que as restrições de conectividade foram aplicadas. Entretanto, como se trata de uma relaxação do problema de arborescência mínima, a completa conectividade não foi garantida. Este comportamento se deve ao fato da ocorrência de ciclos na resposta. Estes ciclos ocorreram de forma mais acentuada nos anos 3 e 5 do horizonte de planejamento. Conforme a resposta obtida no cenário 1, sem aplicação de restrições de conectividade, se observa que nestes anos do HP os talhões agendados para a colheita se encontram mais dispersos se comparados aos demais anos. Desta forma, se espera que a agregação dos talhões nestes anos seja menos eficiente, comparada aos anos 1 e 2, em que os talhões se encontram relativamente agregados no cenário livre.

Os resultados mais satisfatórios, com a utilização de apenas uma raiz por ano, foram obtidos nos cenários 2 e 4 que apresentaram menor dispersão das áreas de colheita. Houve mudança no arranjo espacial dos talhões quando se alteraram as raízes utilizadas nas restrições de conectividade. Nos primeiros 2 anos do HP, os talhões selecionados para a colheita foram essencialmente os mesmos, apenas com alterações de colheita entre os anos 1 e 2. Nos demais anos do HP as mudanças foram mais significativas, principalmente no ano 5 do HP, devido ao fato da agregação maior ao redor dos talhões escolhidos como raízes.

Através da adição de raízes extras nos anos 3 e 5 do HP foi possível melhorar a qualidade da resposta obtida para o cenário 5. No cenário 5 houve uma maior agregação dos talhões principalmente no ano 5 do HP, quando comparado ao cenário 4, em que foram aplicadas as mesmas raízes, porém com apenas uma raiz por ano. Houve também alterações entre os anos de colheita de blocos de talhões inicialmente agendados para o ano 4 no cenário 4, passando para o ano 3 no cenário 5. A partir da adição de raízes adicionais é possível fortalecer as restrições de conectividade, gerando respostas satisfatórias. Entretanto, a adição de raízes

extra também implica no aumento da complexidade do modelo de otimização. Com isso, é necessário um tempo maior de processamento para a factibilização do modelo ou até mesmo à infactibilidade. No cenário 6, em que foram incluídas raízes extra ao cenário 2, não foi possível factibilizar o modelo dentro dos critérios de parada estabelecidos.

Neste sentido, a escolha adequada das raízes a serem utilizadas nas restrições de conectividade tem influência decisiva tanto na qualidade da resposta como no tempo demandado para a resolução do problema. A partir da escolha de raízes parte de regiões em que os talhões se encontram agregados no cenário livre é possível obter resultados mais satisfatórios. Deve-se destacar também que a ocorrência de talhões com diferentes estoques e idades em uma área florestal torna a manutenção do fluxo de madeira onerosa, demandando o corte de talhões de maneira dispersa, dificultando a agregação dos talhões. Desta forma a situação inicial da floresta, no que se refere à distribuição e características dos talhões é decisiva no tempo de resolução e qualidade da resposta obtida através da otimização.

Para todos os cenários testados, exceto para o cenário 6, foi possível obter a solução através do critério de parada considerando o gap entre a solução atual e o ótimo relaxado. Para todos os cenários o gap inferior a 3% foi alcançado em tempos de razoáveis de processamento, inferiores a 3 horas.

Dilkina e Gomes (2006), aplicaram diferentes modelos para obter a conectividade de habitats em um grid contendo 100 vértices. Os autores obtiveram tempos de resolução de 8 horas para o modelo de fluxo de produto único. Conrad et al. (2012) também aplicaram um modelo de fluxo para a formação de habitat e obtiveram resultados variando de resolução em segundos até dias para diferentes tamanhos de grid, resultando em diferente número de vértices. Desta forma, se nota que o tamanho do problema tem influência significativa no tempo de resolução, em virtude da grande quantidade de restrições adicionada ao modelo com o aumento do número de vértices.

A TABELA 7.2 a seguir demonstra o efeito das restrições de conectividade sobre a performance econômica da floresta. Uma vez que a agregação dos talhões tem objetivo de redução de custos, não é interessante do ponto de vista econômico se esta agregação causa uma redução significativa ao VPL florestal.

TABELA 7.2 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

CENÁRIO	VOLUME (M³)	VPL (R\$)	VARIAÇÃO (%)	NÚMERO DE RESTRIÇÕES
1	1.605.675,2	80.375.733,73	-	82.742
2	1.545.116,7	77.446.352,38	-3,6	363.847
3	1.515.050,8	75.779.240,24	-5,7	363.847
4	1.521.772,5	76.026.986,90	-5,4	363.847
5	1.504.693,5	74.977.216,87	-6,7	475.239
6	Infactível	-	-	-

É possível constatar através dos resultados apresentados na tabela 7.2 que a melhor performance foi obtida através do cenário 2, com uma redução de 3,6% do VPL da floresta, quando comparado ao cenário 1, sem restrições de conectividade. O cenário 3 apresentou os piores resultados entre os cenários com apenas uma raiz por ano, com redução de 5,7% ao VPL. A adição de raízes extra no cenário 5 causou uma redução no VPL obtido, passando de R\$ 75.779.240,00 no cenário 4 para R\$ 74.977.216,87 no cenário 5.

De maneira geral, os impactos causados pelas restrições de conectividade à receita advinda da floresta foram aceitáveis. Entretanto se faz necessária a avaliação da redução dos custos de colheita para cada caso, com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica da agregação dos talhões na colheita florestal. Uma

vez que a redução ao VPL obtido seja superior à redução dos custos da colheita, a agregação dos talhões não se torna atrativa.

Vale ressaltar que o tamanho e complexidade do modelo aplicado aumenta consideravelmente com o aumento do número de talhões presentes na floresta. Uma vez que para cada talhões e raiz adicional, um conjunto de restrições é adicionado ao modelo, aumentando consideravelmente sua complexidade, a aplicação em florestas com grande número de talhões pode inviabilizar a obtenção de respostas satisfatórias em tempos razoáveis de processamento.

7.4 CONCLUSÕES

A aplicação do modelo de arborescência mínima é capaz de agregar os talhões agendados para a colheita em um dado ano do horizonte de planejamento, porém a eliminação de ciclos na resposta se mostra uma tarefa complexa. Desta forma, a conectividade total das áreas de colheita não foi obtida na maior parte dos cenários testados.

A utilização de diferentes raízes afeta de forma significativa a resposta obtida tanto no arranjo espacial dos talhões a serem colhidos como sobre o retorno econômico obtido pela otimização.

O melhor resultado foi obtido através do cenário 2, com redução de 3,6% do VPL quando comparado ao cenário livre. Este mesmo cenário obteve performance similar aos cenários 4 e 5 no que se refere à agregação dos talhões a serem colhidos. Desta forma, apresentando melhor performance.

A aplicação de raízes adicionais às restrições de conectividade é capaz de melhorar a resposta obtida pela relaxação *RP cycle*, porém também podem causar um aumento expressivo na complexidade do problema, de forma a impedir a factibilização do modelo em tempos razoáveis de processamento.

7.5 BIBLIOGRAFIA

CONRAD, J. M.; GOMES, C. P.; HOEVE, W. V.; SABHARWAL, A.; SUTER, J. F. **Wildlife corridors as a connected subgraph problem**. Journal of Environmental Economics and Management 63 (2012) 1–18.

CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to algorithms, 3rd edition**. Mit Press, Massachussets, 2009, 1292p.

DILKINA, B.; GOMES, C. P. **Solving connected subgraph problems in wildlife conservation**. CPAIOR-10: 7th International Conference on Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming páginas 102–116, Bologna, Italia, 2010.

FENATO, A. J. **Um Modelo de Caixeiro Viajante Generalizado para Minimizar o Tempo de Preparação de uma Máquina Tubeteira**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Londrina, 2008.

GOLDEN, B.; RAGHAVAN, S.; STANOJEVIC, D. **The prize-collecting generalized minimum spanning tree problem**. J Heuristics (2008) 14: 69–93.

GOUVEIA, L.; SIMONETTI, L; UCHOA, E. **Modelling hop-constrained and diameter-constrained minimum spanning tree problems as Steiner tree problems over layered graphs**. Mathematical Programming 128 (1-2), 123-148, 2011.

GRAHAM, R. L.; HELL, P. **On the history of the minimum spanning tree problem**. Annals of the history of computing, Volume 7, n. 1, 1985.

LAI, K. J.; GOMES, K. P.; SCHWARTZ, M. K.; MCKELVEY, K. S.; CALKIN, D. E.; MONTGOMERY, C. A. **The steiner multigraph problem: Wildlife corridor design for multiple species**. Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2011.

MARTIN, R. **Using separation algorithms to generate mixed integer model reformulations**. Operations Research 10(3), 119–128 (1991).

NORONHA, T. F.; RIBEIRO, C. C.; Santos, A. C. **Solving diameter-constrained minimum spanning tree problems by constraint programming**. International Transactions in Operational Research Volume 17, Issue 5, pages 653–665, September 2010.

ÖNAL, H.; BRIERS, R. A. **Optimal selection of a connected reserve network**. Operations Research, n. 2, 2006, p. 379-388.

POP, P. C. **New models of the generalized minimum spanning tree problem.** Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, n. 3, 153-166, 2004.

POP, P. C. **The generalized minimum spanning tree problem.** Ph.D. Thesis, University of Twente, 2002.

RAVI, R. **Iterative Methods in Combinatorial Optimization.** Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science, 2009.

SEEDGEWICK, R.; WAYNE, K. **Algorithms**, 4th Edition. Princeton University. Pearson Education, 2011, 955p.

SMALTSCHINSKI, T.; SEELING, U.; BECKER, G. **Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimized harvest scheduling.** Annals of Forest Science (2012) 69:651–657.

YANNAKAKIS, M. Expressing Combinatorial Optimization Problems by Linear Programs. JOURNAL OF COMPUTER AND SYSTEM SCIENCES 43, 441-466 (1991).

ANEXO I – LISTA DE TALHÕES

Talhão	Area (ha)	Ano de Plantio	Densidade de Plantio (ár.v./ha)	Espécie	Área Basal (m²/há)
1	6,57869	01/06/2003	1600	PINUS TAEDA	42,76
2	5,69454	01/06/2003	1600	PINUS TAEDA	48,64
3	2,28603	15/11/2007	1667	EUCALYPTUS SPP.	-
4	21,3476	15/11/2007	1667	EUCALYPTUS SPP.	-
5	24,6869	15/02/2008	1600	EUCALYPTUS SPP.	-
6	10,5644	15/09/2005	1600	PINUS TAEDA	37,83
7	4,52329	15/09/2005	1600	PINUS TAEDA	41,68
8	4,86557	15/04/2005	1600	PINUS TAEDA	37,64
9	4,6614	15/06/2005	1600	PINUS TAEDA	37,41
10	11,0841	15/05/2005	1600	PINUS TAEDA	39,8
11	11,8415	15/06/2005	1600	PINUS TAEDA	37,51
12	3,22014	15/01/2005	1600	PINUS TAEDA	36,53
13	3,18059	15/01/2005	1600	PINUS TAEDA	36,53
14	17,9658	15/02/2005	1600	PINUS TAEDA	35,92
15	5,85084	01/01/2005	1600	PINUS TAEDA	25,77
16	6,00704	15/04/2005	1600	PINUS TAEDA	40,23
17	11,9761	15/05/2005	1600	PINUS TAEDA	37,05
18	6,66874	15/05/2005	1600	PINUS TAEDA	38,79
19	4,91972	15/05/2005	1600	PINUS TAEDA	37,82
20	4,33624	15/06/2005	1600	PINUS TAEDA	36,82
21	2,92475	15/06/2005	1600	PINUS TAEDA	34,04
22	3,11371	15/05/2005	1600	PINUS TAEDA	41,62
23	5,35323	15/06/2005	1600	PINUS TAEDA	37,6
24	14,7208	15/09/2005	1600	PINUS TAEDA	34,47
25	9,86107	15/09/2005	1600	PINUS TAEDA	35,13
26	6,9102	15/09/2005	1600	PINUS TAEDA	36,3
27	7,01324	15/08/2005	1333	EUCALYPTUS SPP.	23,26
28	8,49001	15/12/2005	1333	EUCALYPTUS SPP.	18,56
29	2,34321	15/12/2005	1333	EUCALYPTUS SPP.	24,82
30	16,6806	30/03/2009	1667	EUCALYPTUS SPP.	-
31	19,3418	28/02/2009	1667	EUCALYPTUS SPP.	-
32	18,149	30/03/2009	1667	EUCALYPTUS SPP.	-
33	17,3723	30/03/2009	1667	EUCALYPTUS SPP.	-
34	17,1723	30/05/2009	1667	PINUS TAEDA	-
35	17,1836	30/06/2009	1667	PINUS TAEDA	-
36	8,20262	01/11/2008	1667	EUCALYPTUS SPP.	-
37	26,1387	01/09/2009	1667	PINUS TAEDA	-
38	11,2079	01/08/2009	1667	PINUS TAEDA	-
39	4,03875	01/10/2009	1667	EUCALYPTUS SPP.	-
40	29,6674	01/11/2009	1667	PINUS TAEDA	-
41	8,75051	01/12/2009	1667	PINUS TAEDA	-
42	6,44824	01/12/2009	1667	PINUS TAEDA	-
43	17,27	-	1667	PINUS TAEDA	-
44	27,7	-	1667	PINUS TAEDA	-
45	23,1356	-	1667	PINUS TAEDA	-
46	4,33388	15/07/1999	1333	PINUS TAEDA	40,97
47	5,6576	15/09/1999	1333	PINUS TAEDA	35,22
48	3,36662	15/06/1999	1333	PINUS TAEDA	41,07
49	24,205	15/11/1999	1333	PINUS TAEDA	38,55
50	8,02388	15/01/2000	1333	PINUS TAEDA	35,18

51	17,1344	15/03/2000	1333,33	PINUS TAEDA	24,5
52	5,29833	15/03/2000	1333,33	PINUS TAEDA	23,94
53	5,28099	15/06/2000	1333,33	PINUS TAEDA	23,76
54	9,77274	15/02/2000	1333,33	PINUS TAEDA	45,08
55	16,6256	15/07/2000	1333,33	PINUS TAEDA	35,84
56	6,46634	15/05/2000	1333,33	PINUS TAEDA	32,96
57	9,81896	15/05/2000	1333,33	PINUS TAEDA	31,41
58	8,98591	15/06/2000	1333,33	PINUS TAEDA	34,62
59	7,85954	15/02/2006	1600,00	PINUS TAEDA	31,38
60	9,82866	15/02/2006	1600,00	PINUS TAEDA	29,31
61	16,8102	15/10/2006	1600,00	PINUS TAEDA	31,36
62	9,74673	15/12/2006	1600,00	PINUS TAEDA	29,92
63	12,6259	15/06/2006	1600,00	PINUS TAEDA	31,59
64	9,24403	15/02/2006	1600,00	PINUS TAEDA	27,88
65	19,0356	15/03/2006	1600,00	PINUS TAEDA	29,58
66	20,4211	15/01/2007	1600,00	PINUS TAEDA	27,64
67	14,3265	15/04/2002	1333,33	PINUS TAEDA	50,4
68	15,21	15/05/2002	1333,33	PINUS TAEDA	51,11
69	21,772	15/05/2002	1333,33	PINUS TAEDA	49,22
70	20,2495	15/07/2002	1333,33	PINUS TAEDA	50,65
71	13,3043	15/07/2002	1333,33	PINUS TAEDA	50,92
72	5,27742	15/08/2002	1333,33	PINUS TAEDA	51,95
73	9,17061	15/08/2002	1333,33	PINUS TAEDA	54,78
74	12,4216	15/09/2002	1333,33	PINUS TAEDA	56,09
75	2,64892	15/09/2002	1333,33	PINUS TAEDA	54,1
76	4,69958	15/09/2002	1333,33	PINUS TAEDA	51,79
77	4,68877	15/10/2002	1333,33	PINUS TAEDA	43,29
78	8,70775	15/10/2002	1333,33	PINUS TAEDA	50,67
79	5,17758	15/11/2002	1333,33	PINUS TAEDA	51,28
80	5,32614	15/11/2002	1333,33	PINUS TAEDA	50,49
81	6,30345	15/11/2002	1333,33	PINUS TAEDA	51,96
82	1,72931	01/12/2002	1333,33	PINUS TAEDA	0
83	5,08089	30/06/2002	1333,33	PINUS TAEDA	0
84	10,4874	15/02/2003	1600,00	PINUS TAEDA	51,07
85	9,10661	15/02/2003	1600,00	PINUS TAEDA	53,12
86	8,88443	15/02/2003	1600,00	PINUS TAEDA	52,69
87	2,48974	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	56,34
88	2,91436	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	57,34
89	5,80454	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	58,25
90	7,06975	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	56,37
91	5,83558	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	57,11
92	3,91131	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	56,11
93	9,08176	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	50,81
94	2,59187	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	49,32
95	3,93307	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	53,26
96	2,74994	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	51,08
97	4,84399	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	49,76
98	6,88043	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	49,6
99	6,07725	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	54,18
100	3,83054	15/06/2003	1600,00	PINUS TAEDA	54,32
101	3,83874	15/06/2003	1600,00	PINUS TAEDA	55,56

Talhão	Área (ha)	Ano de Plantio	Densidade de Plantio (árv./ha)	Espécie	Área Basal (m²/há)
51	17,1344	15/03/2000	1333,33	PINUS TAEDA	24,5
52	5,29833	15/03/2000	1333,33	PINUS TAEDA	23,94
53	5,28099	15/06/2000	1333,33	PINUS TAEDA	23,76
54	9,77274	15/02/2000	1333,33	PINUS TAEDA	45,08
55	16,6256	15/07/2000	1333,33	PINUS TAEDA	35,84
56	6,46634	15/05/2000	1333,33	PINUS TAEDA	32,96
57	9,81896	15/05/2000	1333,33	PINUS TAEDA	31,41
58	8,98591	15/06/2000	1333,33	PINUS TAEDA	34,62
59	7,85954	15/02/2006	1600,00	PINUS TAEDA	31,38
60	9,82866	15/02/2006	1600,00	PINUS TAEDA	29,31
61	16,8102	15/10/2006	1600,00	PINUS TAEDA	31,36
62	9,74673	15/12/2006	1600,00	PINUS TAEDA	29,92
63	12,6259	15/06/2006	1600,00	PINUS TAEDA	31,59
64	9,24403	15/02/2006	1600,00	PINUS TAEDA	27,88
65	19,0356	15/03/2006	1600,00	PINUS TAEDA	29,58
66	20,4211	15/01/2007	1600,00	PINUS TAEDA	27,64
67	14,3265	15/04/2002	1333,33	PINUS TAEDA	50,4
68	15,21	15/05/2002	1333,33	PINUS TAEDA	51,11
69	21,772	15/05/2002	1333,33	PINUS TAEDA	49,22
70	20,2495	15/07/2002	1333,33	PINUS TAEDA	50,65
71	13,3043	15/07/2002	1333,33	PINUS TAEDA	50,92
72	5,27742	15/08/2002	1333,33	PINUS TAEDA	51,95
73	9,17061	15/08/2002	1333,33	PINUS TAEDA	54,78
74	12,4216	15/09/2002	1333,33	PINUS TAEDA	56,09
75	2,64892	15/09/2002	1333,33	PINUS TAEDA	54,1
76	4,69958	15/09/2002	1333,33	PINUS TAEDA	51,79
77	4,68877	15/10/2002	1333,33	PINUS TAEDA	43,29
78	8,70775	15/10/2002	1333,33	PINUS TAEDA	50,67
79	5,17758	15/11/2002	1333,33	PINUS TAEDA	51,28
80	5,32614	15/11/2002	1333,33	PINUS TAEDA	50,49
81	6,30345	15/11/2002	1333,33	PINUS TAEDA	51,96
82	1,72931	01/12/2002	1333,33	PINUS TAEDA	-
83	5,08089	30/06/2002	1333,33	PINUS TAEDA	-
84	10,4874	15/02/2003	1600,00	PINUS TAEDA	51,07
85	9,10661	15/02/2003	1600,00	PINUS TAEDA	53,12
86	8,88443	15/02/2003	1600,00	PINUS TAEDA	52,69
87	2,48974	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	56,34
88	2,91436	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	57,34
89	5,80454	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	58,25
90	7,06975	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	56,37
91	5,83558	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	57,11
92	3,91131	15/04/2003	1600,00	PINUS TAEDA	56,11
93	9,08176	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	50,81
94	2,59187	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	49,32
95	3,93307	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	53,26
96	2,74994	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	51,08
97	4,84399	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	49,76
98	6,88043	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	49,6
99	6,07725	15/05/2003	1600,00	PINUS TAEDA	54,18
100	3,83054	15/06/2003	1600,00	PINUS TAEDA	54,32

Talhão	Área (ha)	Ano de Plantio	Densidade de Plantio (árv./ha)	Espécie	Área Basal (m²/há)
101	3,83874	15/06/2003	1600,00	PINUS TAEDA	55,56
102	5,73482	15/06/2003	1600,00	PINUS TAEDA	53,57
103	7,59532	15/06/2003	1600,00	PINUS TAEDA	57,02
104	7,88115	15/06/2003	1600,00	PINUS TAEDA	58,45
105	6,74313	15/06/2003	1600,00	PINUS TAEDA	54,81
106	5,07328	15/07/2003	1600,00	PINUS TAEDA	53,61
107	6,27473	15/07/2003	1600,00	PINUS TAEDA	51,21
108	7,6957	15/09/2003	1600,00	PINUS TAEDA	43,92
109	6,95462	15/07/2003	1600,00	PINUS TAEDA	51,86
110	2,75644	15/07/2003	1600,00	PINUS TAEDA	50,71
111	7,37813	15/07/2003	1600,00	PINUS TAEDA	52,96
112	6,13094	15/07/2003	1600,00	PINUS TAEDA	52,71
113	11,414	15/08/2003	1600,00	PINUS TAEDA	50,33
114	6,70845	15/08/2003	1600,00	PINUS TAEDA	43,64
115	10,4985	15/09/2003	1600,00	PINUS TAEDA	49,8
116	8,36366	15/10/2003	1600,00	PINUS TAEDA	49,54
117	3,16628	15/10/2003	1600,00	PINUS TAEDA	52,77
118	5,62522	15/10/2003	1600,00	PINUS TAEDA	41,96
119	11,0457	15/10/2003	1600,00	PINUS TAEDA	47,06
120	8,63224	15/12/2003	1600,00	PINUS TAEDA	47,53
121	5,6105	15/11/2003	1600,00	PINUS TAEDA	42,85
122	4,14847	15/11/2003	1600,00	PINUS TAEDA	39,73
123	12,8723	15/12/2003	1600,00	PINUS TAEDA	48,99
124	5,02793	15/12/2003	1600,00	PINUS TAEDA	48,04
125	4,76196	15/01/2004	1600,00	PINUS TAEDA	45,31
126	8,81257	15/01/2004	1600,00	PINUS TAEDA	51,21
127	13,0789	15/02/2004	1600,00	PINUS TAEDA	46,73
128	6,38201	15/04/2004	1600,00	PINUS TAEDA	49,28
129	6,48965	15/05/2004	1600,00	PINUS TAEDA	45,25
130	10,442	15/05/2004	1600,00	PINUS TAEDA	45,71
131	7,90074	15/05/2004	1600,00	PINUS TAEDA	44,24
132	7,51121	15/05/2004	1600,00	PINUS TAEDA	40,56
133	6,31111	15/06/2004	1600,00	PINUS DIVERSOS	38,88
134	18,8538	15/06/2004	1600,00	PINUS TAEDA	42,75
135	8,12656	15/06/2004	1600,00	PINUS TAEDA	45,61
136	15,9679	15/07/2004	1600,00	PINUS TAEDA	43,58
137	8,88239	15/08/2004	1600,00	PINUS TAEDA	40,56
138	15,1863	15/08/2004	1600,00	PINUS TAEDA	45,37
139	12,2997	15/07/2004	1600,00	PINUS TAEDA	41,82
140	8,07756	15/08/2004	1600,00	PINUS TAEDA	43,45
141	9,40884	15/09/2004	1600,00	PINUS DIVERSOS	42,79
142	4,81248	15/09/2004	1600,00	PINUS TAEDA	40,57
143	0,582034	15/10/2004	1600,00	PINUS DIVERSOS	-
144	0,748766	15/01/2007	1600,00	PINUS TAEDA	-
145	10,8935	15/01/2007	1600,00	PINUS TAEDA	28,75
146	6,7383	15/01/2007	1600,00	PINUS TAEDA	30,95
147	7,45576	15/02/2007	1600,00	PINUS TAEDA	29,49
148	9,95707	15/03/2007	1600,00	PINUS TAEDA	29
149	6,1912	15/03/2007	1600,00	PINUS TAEDA	29,76
150	4,57154	15/03/2007	1600,00	PINUS TAEDA	29,04

Talhão	Área (ha)	Ano de Plantio	Densidade de Plantio (árv./ha)	Espécie	Área Basal (m²/há)
151	5,74339	15/12/2007	1600,00	EUCALYPTUS SPP.	18,7
152	4,64322	15/11/2007	1600,00	PINUS TAEDA	14,4
153	11,0222	15/04/2007	1600,00	PINUS TAEDA	26,53
154	7,20697	15/08/2007	1600,00	PINUS TAEDA	19,89
155	10,9828	15/09/2007	1600,00	PINUS TAEDA	16,19
156	9,46182	15/10/2007	1600,00	PINUS TAEDA	21,41
157	7,71782	15/09/2007	1600,00	PINUS TAEDA	18,28
158	12,1762	15/11/2007	1600,00	EUCALYPTUS SPP.	16,72
159	11,5017	15/01/2008	1600,00	EUCALYPTUS SPP.	22,62
160	21,5057	12/11/2007	1600,00	EUCALYPTUS SPP.	16,69
161	23,0494	01/05/2008	1600,00	PINUS TAEDA	-
162	15,819	01/06/2008	1600,00	PINUS TAEDA	-
163	18,3946	01/08/2008	1600,00	PINUS TAEDA	-
164	9,85526	01/09/2008	1600,00	PINUS TAEDA	-
165	12,632	01/09/2008	1600,00	PINUS TAEDA	-
166	12,1439	01/04/2008	1600,00	PINUS TAEDA	-
167	16,0052	01/06/2008	1111,11	EUCALYPTUS SPP.	-
168	10,9623	01/06/2008	1111,11	EUCALYPTUS SPP.	-
169	8,44437	15/08/2008	1600,00	PINUS TAEDA	-
170	17,4617	15/08/2008	1600,00	PINUS TAEDA	-
171	11,2309	01/04/2010	1666,67	PINUS TAEDA	-
172	23,6005	01/05/2010	1666,67	PINUS TAEDA	-
173	10,3002	01/05/2010	1666,67	PINUS TAEDA	-
174	11,0843	01/06/2010	1666,67	PINUS TAEDA	-
175	29,1995	03/01/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
176	25,4752	01/02/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
177	13,5244	01/02/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
178	14,3523	27/04/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
179	16,1174	23/03/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
180	15,2941	26/04/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
181	12,5336	08/05/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
182	11,1188	03/06/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
183	12,9362	11/06/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
184	9,77364	23/06/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
185	20,106	07/07/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
186	15,4032	05/07/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
187	17,5281	20/06/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
188	17,9164	12/07/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
189	15,4043	20/07/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
190	30,8174	15/06/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
191	11,0113	15/06/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
192	15,6139	15/06/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
193	12,6914	15/06/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
194	10,1277	15/06/2011	1666,67	PINUS TAEDA	-
195	19,063	27/06/2012	1666,67	PINUS TAEDA	-
196	9,26686	15/05/1997	1333,33	PINUS TAEDA	44,21
197	2,4324	15/11/1997	1333,33	PINUS DIVERSOS	44,35
198	12,784	15/09/1997	1333,33	PINUS TAEDA	49
199	4,75183	15/09/1997	1333,33	PINUS DIVERSOS	40,82
200	7,62652	15/01/1998	1333,33	PINUS TAEDA	45,52

Talhão	Área (ha)	Ano de Plantio	Densidade de Plantio (árv./ha)	Espécie	Área Basal (m²/há)
201	16,8918	15/03/1998	1333,33	PINUS TAEDA	46,53
202	11,3527	15/01/1998	1333,33	PINUS DIVERSOS	47,77
203	22,9217	15/11/1997	1333,33	PINUS DIVERSOS	44,97
204	13,5199	15/10/1997	1333,33	PINUS DIVERSOS	43,54
205	5,61015	15/10/1997	1333,33	PINUS DIVERSOS	43,27
206	9,62465	15/03/1997	1333,33	PINUS TAEDA	42,9
207	13,8113	15/04/1998	1333,33	PINUS TAEDA	48,84
208	10,8757	15/10/1998	1333,33	PINUS TAEDA	45,89
209	15,5877	15/02/1998	1333,33	PINUS TAEDA	44,58
210	9,74354	15/01/1998	1333,33	PINUS TAEDA	47,6
211	25,4905	15/10/1998	1333,33	PINUS TAEDA	40,48
212	12,3237	15/12/1998	1333,33	PINUS TAEDA	44,63
213	18,1987	15/12/1998	1333,33	PINUS TAEDA	50,01
214	4,17388	15/04/1998	1333,33	PINUS TAEDA	38,67
215	5,75341	15/04/2006	1600,00	PINUS TAEDA	28,62
216	19,4069	15/05/2006	1600,00	PINUS TAEDA	31,72
217	10,7951	15/05/2006	1600,00	PINUS TAEDA	31,99
218	16,6483	15/06/2006	1600,00	PINUS TAEDA	31,9
219	3,87461	15/07/2006	1600,00	PINUS TAEDA	29,95
220	7,60386	15/07/2006	1600,00	PINUS TAEDA	33,37
221	14,3561	15/11/2006	1600,00	PINUS TAEDA	32,52
222	3,66654	15/09/2006	1600,00	PINUS TAEDA	27,39
223	4,55645	15/07/2006	1600,00	PINUS TAEDA	25,63
224	10,4775	15/07/2006	1600,00	PINUS TAEDA	34,36
225	6,60142	15/06/2001	1111,11	PINUS DIVERSOS	38,06
226	3,71348	15/06/2001	1111,11	PINUS DIVERSOS	31,9
227	14,7668	15/06/2001	1111,11	PINUS DIVERSOS	31,01
228	3,38884	15/06/2001	1111,11	PINUS DIVERSOS	32,01
229	8,27677	15/06/2002	1111,11	PINUS DIVERSOS	22,67
230	8,44299	15/06/2002	1111,11	PINUS DIVERSOS	15,59
231	1,09136	15/06/2003	1333,33	PINUS DIVERSOS	26,6
232	8,0587	15/06/1998	1111,11	PINUS DIVERSOS	38,03
233	5,72392	15/06/1998	1111,11	PINUS DIVERSOS	35,46
234	13,1009	15/06/1998	1111,11	PINUS DIVERSOS	39,2
235	5,49954	15/06/1998	1111,11	PINUS DIVERSOS	38,68
236	6,02875	15/06/1998	1111,11	PINUS DIVERSOS	36,37

ANEXO II – LISTA DE ADJACÊNCIAS

Talhão	Vizinhos										
1:	2	5									
2:	1										
3:	4	5									
4:	3	5									
5:	1	3	4	183							
6:	7	14	17								
7:	6	11	14								
8:	10										
9:	44										
10:	8	11	12	13	43						
11:	7	10	12	14							
12:	10	11	13	14							
13:	10	12	14								
14:	6	7	11	12	13	24					
15:	24	54									
16:	23										
17:	6	18	19								
18:	17	19	20								
19:	17	18	20				23				
20:	18	19									
21:	22										
22:	21	23									
23:	16	19					22				
24:	14	15	25	54							
25:	24	54									
26:	59										
27:	28	37	38	189							
28:	27	47									
29:	215										
30:	31	32	216	218							
31:	30	32	33	40			218	219			
32:	30	31	33								
33:	31	32	35								
34:	35	143									
35:	33	34					40	41			
36:	37	38	186								
37:	27	36	38				39	46	186	189	
38:	27	36	37				186				
39:	37										
40:	31	35	41	42	171	173					

41:	35	40	42		
42:	40	41	154	171	172
43:	10	44	189		
44:	9	43	194		
45:	138	227	235		
46:	37	189			
47:	28	190			
48:	216				
49:	63	64	150	161	162
50:	161				
51:	52	53	161	195	
52:	51	53	161		
53:	51	52	195		
54:	15	24	25		
55:	56	165			
56:	55	57			
57:	56	58			
58:	57				
59:	26	60	65		
60:	59				
61:	62				
62:	61	163			
63:	49	64	65	162	
64:	49	63	65	66	148
65:	59	63	64	66	
66:	64	65	145	147	148
67:	68	69	210	225	229
68:	67	69	70	208	209
69:	67	68	70	71	226
70:	68	69	71	208	
71:	69	70	226		
72:	115	116	117		
73:	74	81	84		
74:	73	76			
75:	99	115	207		
76:	74	77			
77:	76	78	204		
78:	77	204			
79:	80	204	205		
80:	79	205	206		
81:	73	84			
82:	184				

83:	195				
84:	73	81	85	86	101
85:	84	86	87		
86:	84	85	87	88	202
87:	85	86	88		
88:	86	87	91	202	
89:	90	91	108		
90:	89	92			
91:	88	89	92	93	
92:	90	91			
93:	91	94	213	214	
94:	93	95	96	213	
95:	94	97	197	213	
96:	94	97	98		
97:	95	96	98	197	198
98:	96	97	198		
99:	75	105	109	207	
100:	104	105			
101:	84	102	104		
102:	101	103			
103:	102	104	106		
104:	100	101	103	105	106
105:	99	100	104	109	
106:	103	104	107	109	
107:	106	108	109	110	
108:	89	107			
109:	99	105	106	107	
110:	107				
111:	113				
112:	113	207			
113:	111	112	114		
114:	113				
115:	72	75	116		
116:	72	115	117	118	
117:	72	116	121		
118:	116				
119:	120				
120:	119	122			
121:	117	122			
122:	120	121			
123:	124	127	128		
124:	123	125	127		

125:	124	126	127	137	228	233	
126:	125	129	130	137			
127:	123	124	125	128			
128:	123	127	143				
129:	126	130					
130:	126	129	135				
131:	132	133					
132:	131	133	134	135			
133:	131	132	134				
134:	132	133	135				
135:	130	132	134				
136:	138	139					
137:	125	126	234				
138:	45	136	139				
139:	136	138					
140:	141						
141:	140	142					
142:	141	236					
143:	34	128					
144:	145	188					
145:	66	144	146	147	188		
146:	145	147	148				
147:	66	145	146	148			
148:	64	66	146	147	149		
149:	148						
150:	49						
151:	159	160	166	180	181		
152:	155	157	158	159			
153:	172	220	224				
154:	42	155	178				
155:	152	154	156	157	158	168	
156:	155	157	159	166	178		
157:	152	155	156	159			
158:	152	155	159	160	167	168	
159:	151	152	156	157	158	160	166
160:	151	158	159	167	170	181	
161:	49	50	51	52			
162:	49	63	163				
163:	62	162	164				
164:	163	165					
165:	55	164					
166:	151	156	159	178	179	180	

167:	158	160	168	170		
168:	155	158	167	169		
169:	168	170				
170:	160	167	169	215		
171:	40	42	172	173		
172:	42	153	171	173	220	221
173:	40	171	172	219	221	
174:	178					
175:	176	179				
176:	175	177				
177:	176	187	188			
178:	154	156	166	174	179	
179:	166	175	178	180		
180:	151	166	179			
181:	151	160				
182:	191	193	195			
183:	5	195				
184:	82	185				
185:	184	186	187			
186:	36	37	38	185	187	
187:	177	185	186			
188:	144	145	177			
189:	27	37	43	46		
190:	47	194				
191:	182	193				
192:	193					
193:	182	191	192			
194:	44	190				
195:	51	53	83	182	183	
196:	199	200				
197:	95	97	201	213		
198:	97	98				
199:	196	203				
200:	196	201				
201:	197	200	212	213		
202:	86	88				
203:	199					
204:	77	78	79	205		
205:	79	80	204	206		
206:	80	205	208			
207:	75	99	112			
208:	68	70	206	209		

209:	68	208	210			
210:	67	209				
211:	212					
212:	201	211	213			
213:	93	94	95	197	201	212
214:	93					
215:	29	170				
216:	30	48	217			
217:	216	218				
218:	30	31	217	219		
219:	31	173	218			
220:	153	172	221	224		
221:	172	173	220	222	223	224
222:	221					
223:	221	224				
224:	153	220	221	223		
225:	67	226	227	229		
226:	69	71	225	227		
227:	45	225	226	232		
228:	125	233	234			
229:	67	225				
230:	231	235				
231:	230					
232:	227	233	234			
233:	125	228	232	234		
234:	137	228	232	233		
235:	45	230	236			
236:	142	235				